

Experimentalpsychologische Untersuchungen
zu Navigationsstrategien unter Berücksichtigung physiologischer und
endokrinologischer Variablen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Sophie Hinrichs

aus Bremen

Göttingen 2008

D 7

Referent: Prof. Dr. Gerd Lüer

Koreferentin: Prof. Dr. Uta Lass

Tag der mündlichen Prüfung: 21.10.2008

Danksagung

Diese Arbeit wäre in dieser Form nicht zustande gekommen ohne die Unterstützung Anderer, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

In erster Linie bin ich Herrn Prof. Gerd Lürer für sein Vertrauen, seine Unterstützung und die richtigen Worte zur richtigen Zeit zu herzlichem Dank verpflichtet. Danke auch an Frau Prof. Uta Lass für eine nette Zusammenarbeit und die Übernahme des Koreferats.

Ich danke Dr. Kirsten Jordan ganz herzlich für die fachliche, inhaltliche und menschliche Unterstützung und das Vertrauen. Für den vor allem technischen und methodischen Beistand danke ich Dipl.-Ing. Torsten Wüstenberg. Ich danke ihm sogar für manchmal harte, aber immer konstruktive Worte. Ferner danke ich der „Neurogruppe“ der Abteilung Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie des Universitätsklinikums Göttingen in unterschiedlicher Zusammensetzung für rege Diskussionen.

Danke auch an Kathrin Behrens, ohne die es weniger lustig und deutlich stressiger gewesen wäre und ohne die ich die ersten beiden Studien nicht so schnell hätte durchführen können. Ilona Pfahlert, MTA in der MR-Gruppe am Universitätsklinikum Göttingen, danke ich für den Humor und die Geduld, mit denen sie zahlreichen Rückschlägen und Problemen begegnet ist.

Danke an meinen Bruder Christian Hinrichs, an Stine Heintze, Brigitta Kurtz und besonders Ulrike Haberland für das Korrekturlesen.

Schließlich danke ich noch meiner Familie und meinen Freunden für die Geduld mit mir und das Vertrauen! Besonders danke ich dabei meinem Lebensgefährten Artur Foitzik, vor allem dafür, dass er einfach da war und ist.

Und ganz zum Schluss danke ich noch meiner Nichte Lea für den erstaunlich motivierenden Satz: „Dann schreib die Arbeit doch jetzt schnell mal fertig und dann können wir spielen.“. Ab jetzt, liebe Lea, wird wieder mehr gespielt!

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	ix
1. Theoretisch-empirischer Hintergrund	1
1.1 Einführung	1
1.2 Räumliche Orientierung und Navigation	2
1.3 Strategien räumlicher Navigation	5
1.3.1 Räumliche Referenzsysteme	5
1.3.2 Räumliche Repräsentationen	7
1.3.3 Navigationsstrategien	12
1.4 Geschlecht und räumliche Navigation	16
1.4.1 Geschlechtsunterschiede in räumlichen Aufgaben	16
1.4.2 Geschlecht und Leistung in Navigationsaufgaben	16
1.4.3 Geschlecht und Navigationsstrategien	18
1.5 Sexualhormone und räumliche Navigation	20
1.5.1 Sexualhormone	20
1.5.1.1 Hormone, Steroidhormone; Sexualhormone	20
1.5.1.2 Der weibliche Menstruationszyklus	21
1.5.1.3 Wirkung von Sexualhormonen	23
1.5.2 Sexualhormone und räumliche Navigationsleistung	26
1.5.2.1 Sexualhormone und kognitive Leistungen	26
1.5.2.2 Sexualhormone und räumliche Navigation	28
1.5.3 Sexualhormone und Navigationsstrategien	29
1.6 Neuronales Korrelat der räumlichen Navigation	30
1.6.1 Allgemein	30
1.6.2 Geschlechtsunterschiede	33
1.6.3 Strategieunterschiede	35
1.6.4 Einfluss von Sexualhormonen auf neuronale Aktivierungen	38
1.7 Schlussfolgerungen	39
2 Studie 1: Navigationsstrategien und der Einfluss von Geschlecht und Sexualhormonen	41
2.1 Einführung	41
2.2 Methode	44
2.2.1 Probandinnen und Probanden	44
2.2.2 Versuchsablauf	44
2.2.3 Materialien	45
2.2.3.1 Mentaler Rotationstest (MRT)	45
2.2.3.2 Virtuelles Labyrinth	45
2.2.3.3 Fragebögen	48
2.2.4 Speichelproben	49

2.3	Ergebnisse	50
2.3.1	Analyse der Sexualhormone	50
2.3.2	Strategiedifferenzierung	52
2.3.2.1	Strategiedifferenzierung durch Virtuelles Labyrinth	52
2.3.2.2	Strategiedifferenzierung durch Fragebögen	55
2.3.2.3	Strategien im Labyrinth und Strategien erfasst durch Fragebogen	55
2.3.3	Leistungsparameter	56
2.3.3.1	Geschlechtsunterschiede	56
2.3.3.2	Zusammenhang mit Sexualhormonen	56
2.3.3.3	Fragebogen	57
2.3.4	Strategiewahl	58
2.3.4.1	Geschlechtsunterschiede	58
2.3.4.2	Zusammenhang mit Sexualhormonen	58
2.3.4.3	Fragebogen	62
2.3.5	Mentaler Rotationstest (MRT)	64
2.3.5.1	Geschlechtsunterschiede	64
2.3.5.2	Zusammenhang mit Sexualhormonen	65
2.3.5.3	Zusammenhang MRT und Virtuelles Labyrinth	66
2.3.6	Ergebniszusammenfassung	67
2.4	Diskussion	68
3	Studie 2: Neuronales Korrelat räumlicher Navigationsstrategien	76
3.1	Einführung	76
3.2	Methode	78
3.2.1	Probandinnen und Probanden	78
3.2.2	Versuchsablauf	78
3.2.3	Funktionelle Magnetresonanztomographie	80
3.2.3.1	Aufnahmegerät und Parameter	80
3.2.3.2	MR-Zusatzmaterialien	81
3.2.4	Materialien	82
3.2.4.1	Virtuelles Labyrinth	82
3.2.4.2	Fragebögen	84
3.2.5	Analyse der Speichelproben	86
3.2.6	Analyse der Blutproben	86
3.2.7	Analyse der fMRI-Daten	86
3.2.7.1	Vorverarbeitung (Preprocessing)	86
3.2.7.2	Analyse der Aktivierungsdaten	88
3.2.7.3	Bestimmung der Hirnregion	91
3.3	Ergebnisse	93
3.3.1	Analyse der Sexualhormone	93
3.3.2	Verhaltensparameter	94
3.3.2.1	Leistungsparameter	94
3.3.2.2	Strategieunterschiede	96
3.3.3	Fragebogendaten	97
3.3.4	Aktivierungsdaten (fMRI-Daten)	100

3.3.4.1	Neuronales Korrelat räumlicher Navigation	100
3.3.4.2	Neuronale Aktivierungsmuster in Abhängigkeit vom Geschlecht	102
3.3.4.3	Neuronale Aktivierungsmuster in Abhängigkeit von der Strategiewahl	106
3.3.4.4	Einfluss der Sexualhormone auf die neuronalen Aktivierungen	110
3.3.5	Ergebniszusammenfassung	115
3.4	Diskussion	117
4	Studie 3: Räumliche Referenzsysteme und Navigationsstrategien	134
4.1	Einführung	134
4.2	Methode	137
4.2.1	Probandinnen und Probanden	137
4.2.2	Versuchsablauf	137
4.2.3	Materialien	137
4.2.3.1	Virtuelles Labyrinth	137
4.2.3.2	Tunnel	138
4.2.3.3	Strategiefragebögen	140
4.2.3.4	NEO-FFI	140
4.2.3.5	Zahlenverbindungstest (ZVT)	141
4.3	Ergebnisse	142
4.3.1	Zusammenhang Referenzsysteme und Navigationsstrategien	142
4.3.2	Geschlechtsunterschiede	144
4.3.2.1	Leistungsparameter	144
4.3.2.2	Navigationsstrategien	146
4.3.2.3	Räumliche Referenzsysteme	147
4.3.3	Unterschiede aufgrund der Navigationsstrategie	148
4.3.3.1	Leistungsparameter	148
4.3.3.2	Fragebogendaten	149
4.3.4	Unterschiede aufgrund des verwendeten Referenzsystems	150
4.3.4.1	Leistungsparameter	150
4.3.4.2	Fragebogendaten	151
4.3.5	Navigationsstrategien und Persönlichkeit	152
4.3.6	Ergebniszusammenfassung	153
4.4	Diskussion	154
5	Allgemeine Diskussion	158
5.1	Strategiebegriff	158
5.2	Geschlechtsunterschiede	164
5.3	Sexualhormone und räumliche Navigation	168
5.4	Schlussdiskussion und Ausblick	169
6	Zusammenfassung	172
	Literaturverzeichnis	
	Anhang	
	Lebenslauf	

Abkürzungsverzeichnis

µg	Mikrogramm ($10^6 \mu\text{g} = 1 \text{ Gramm}$)
Abb.	Abbildung
ACh	Acetylcholin
ADP	Adenosindiphosphat
ALM	Allgemeines Lineares Modell
ANOVA	Varianzanalyse (<i>Analysis of Variance</i>)
ASS	Alltags-Strategie-Skala
ATP	Adenosintriphosphat
AV	Abhängige Variable
B_0	Stärke des externen Magnetfeldes beim MRI
BOLD	<i>Blood Oxygenation Level Dependent</i> (deutsch: vom Sauerstoffgehalt im Blut abhängig)
cm	Zentimeter ($1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ Meter}$)
c_{nav}	Navigationsstrategiekoeffizient
c_{Ref}	Referenzsystemskoeffizient
D3	letzter Lerndurchgang im virtuellen Labyrinth (Studie 2)
D4	Testdurchgang im virtuellen Labyrinth (Studie 2)
D5	Kontrolldurchgang im virtuellen Labyrinth (Studie 2)
df	Freiheitsgrade
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DPZ	Deutsches Primatenzentrum Göttingen
dQSR	deutsche Übersetzung des Fragebogens zu räumlichen Repräsentationen (QSR)
ebd.	ebenda
EEG	Elektroenzephalogramm
EPI	Echo Planar Imaging
EPSP	exzitatorisches postsynaptisches Potential
et al.	und andere (<i>et alii</i>)
EV	Eigenvariate
Fa.	Firma
FDR	False Discovery Rate
FID	Freier Induktionszerfall (<i>free induction decay</i>)
fMRI	funktionelle Magnetresonanztomographie (<i>functional magnetic resonance imaging</i>)
FWE	Familywise Error
GABA	Gamma-Aminobuttersäure
hIP	humanes intraparietales Areal
hOC5	humaner Occipitalcortex 5 (sekundäres visuelles Areal)
l	Liter
LCD	Flüssigkristallbildschirm (<i>Liquid Crystal Display</i>)
LIA	Lumineszenzimmunoassay
M	Mittelwert
maze-FB	maze-Fragebogen: Strategiefragebogen zum virtuellen Labyrinth
Med	Median
ml	Milliliter ($10^3 \text{ ml} = 1 \text{ Liter}$)
MNI	Montreal Neurological Institute (Standardisiertes Koordinatensystem im Gehirn)
MRI	Magnetresonanztomographie (<i>magnetic resonance imaging</i>)
mRNA	messenger-Ribonukleinsäure
MRT	Mentaler Rotationstest
MWM	Morris-Wasserlabyrinth (<i>Morris Water Maze</i>)
M_{xy}	Magnetisierung in der xy-Ebene (transversale oder Quermagnetisierung)
M_z	Magnetisierung in z-Richtung (longitudinale oder Längsmagnetisierung)
n.s.	nicht signifikant
NEO-FFI	NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (Persönlichkeitsfragebogen)
ng	Nanogramm ($10^9 \text{ ng} = 1 \text{ Gramm}$)
NMDA	N-Methyl-D-Aspartat
Ö	Östrogen
P	Progesteron
Pbn	Probandinnen und Probanden
pg	Picogramm ($10^{12} \text{ pg} = 1 \text{ Gramm}$)
QSR	Fragebogen zu räumlichen Repräsentation (<i>Questionnaire of Spatial Representations</i>)
rCBF	regionaler cerebraler Blutfluss
RF	Radiofrequenz
s	Sekunde

s.a.	siehe auch
s.o.	siehe oben
s.u.	siehe unten
SD	Standardabweichung (<i>standard deviation</i>)
SMA	supplementäres Motorareal (<i>supplementary motor area</i>)
SoD	Orientierungssinn (<i>sense of direction</i>)
SPM	Statistical Parametric Mapping
SPSS	Statistiksoftware
T	Testosteron
T ₁	Zeitkonstante (bis die longitudinale Magnetisierung wieder zu 63 % hergestellt ist)
T ₂	Zeitkonstante (nach der die transversale Magnetisierung auf 37 % des Wertes direkt nach der Anregung abgesunken ist)
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TMS	transkranielle Magnetstimulation
TR	Repetitionzeit
usw.	und so weiter
UV	Unabhängige Variable
vgl.	vergleiche
VMWM	virtuelles Morris-Wasserlabyrinth (<i>virtual Morris Water Maze</i>)
VOI	volume of interest
VR	Virtuelle Realität
vx	Voxel
WM	Weißer Substanz (<i>white matter</i>)
z.B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem
ZVT	Zahlenverbindungstest

<u>Abbildungsverzeichnis</u>		Seite
Abb.1	Räumliche Orientierung und Navigation	2
Abb.2	Routen- und Überblickswissen	11
Abb.3	Weiblicher Menstruationszyklus	22
Abb.4	Versuchsaufbau der Studien von Korol	29
Abb.5	Hippocampusformation	31
Abb.6	Neuronale Geschlechtsunterschiede während Navigation bei Schadow et al.	34
Abb.7	Virtuelles Labyrinth	46
Abb.8	Verteilung des Navigationsstrategieeffizienten in Studie 1 über alle Pbn	53
Abb.9	Cluster-Dendrogramm zur Strategiezuweisung (Studie 1)	54
Abb.10	Streudiagramm: Zusammenhang Navigationsstrategie und Progesteron	59
Abb.11	Balkendiagramm: Progesteronkonzentration pro Strategiegruppe	61
Abb.12	Balkendiagramm: Navigationsstrategie und Reproduktion des Labyrinthgrundrisses	63
Abb.13	Balkendiagramm: Geschlechtsunterschiede im MRT	64
Abb.14	Streudiagramm: Zusammenhang Testosteron und MRT	65
Abb.15	Balkendiagramm: MRT und Strategiegruppe	66
Abb.16	Schematischer Aufbau der Labyrinthdurchgänge in Studie 2	82
Abb.17	Ablauf eines Trials im Virtuellen Labyrinth in Studie 2 (fMRI)	83
Abb.18	Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte bei fMRI-Daten	87
Abb.19	Beispiel für Designmatrizen von Einzel-Pbn in Studie 2	89
Abb.20	Second-Level-Modelle für die fMRI-Gruppenanalysen	90
Abb.21	Boxplot: Leistungen im Virtuellen Labyrinth nach Geschlechtern (Studie 2)	95
Abb.22	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Baseline (alle Pbn)	101
Abb.23	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Kontrolle (alle Pbn)	102
Abb.24	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Kontrolle (Männer)	103
Abb.25	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Kontrolle (Frauen)	104
Abb.26	Neuronale Aktivierungen: Geschlechtsdifferenzen	106
Abb.27	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Kontrolle (externale Strategie)	108
Abb.28	Neuronale Aktivierungen Navigation gegen Kontrolle (internale Strategie)	108
Abb.29	Neuronale Aktivierungen: Strategievergleich	110
Abb.30	Tunnelparadigma nach Gramann	139
Abb.31	Schematische Darstellung der Erfassung räumlicher Referenzsysteme im Tunnel	139
Abb.32	Balkendiagramm: Referenzsystemkoeffizient und Navigationsstrategie	143
Abb.33	Boxplot: Leistungen im Virtuellen Labyrinth nach Geschlechtern (Studie 3)	145
Abb.34	Balkendiagramm: Referenzsystem und Geschlecht	147
Abb.35	Boxplot: Leistungen im Virtuellen Labyrinth nach Strategien (Studie 3)	148
Abb.36	Graphenansatz zu Landmarken-, Routen- und Überblickswissen von Gillner & Mallot	155
Abb.37	Vorschlag zur Feinstrukturierung räumlicher Navigationsstrategien	163

<u>Tabellenverzeichnis</u>		Seite
Tab. 1	Schematische Darstellung der drei Bedingungen im Virtuellen Labyrinth (Studie 1)	47
Tab. 2	Deskriptive Statistiken der Sexualhormone Progesteron und Testosteron (Studie 1)	51
Tab. 3	Korrelationsmatrix: Zusammenhang zwischen Navigationsstrategien und Strategien erfasst durch die ASS	55
Tab. 4	Leistungsparameter nach Geschlecht (Studie 1)	56
Tab. 5	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter (Studie 1)	57
Tab. 6	Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die drei Experimentalgruppen (Studie 1)	57
Tab. 7	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung von Strategie auf Geschlecht (Studie 1)	58
Tab. 8	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung von Strategie auf die drei Experimentalbedingungen (Studie 1)	60
Tab. 9	Deskriptive Statistiken Strategiewahl für alle drei Experimentalgruppen, sowie die Geschlechter und die Gesamtstichprobe (Studie 1)	61
Tab. 10	Einschätzungen im Navigationsstrategiefragebogen ASS nach Geschlechtern (Studie 1)	62
Tab. 11	Einschätzungen im Navigationsstrategiefragebogen ASS nach Experimentalgruppen (Studie 1)	62
Tab. 12	Kreuztabelle: Häufigkeit der richtigen Wiedergabe des Labyrinthgrundrisses in Bezug auf die bevorzugte Strategie im Virtuellen Labyrinth (Studie 1)	64
Tab. 13	Aufnahmeparameter der anatomischen und funktionellen Messung in der fMRI-Studie	81
Tab. 14	Faktoren des QSR und des dQSR	85
Tab. 15	Deskriptive Statistiken der Sexualhormone (Studie 2)	93
Tab. 16	Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter (Studie 2)	95
Tab. 17	Kreuztabelle: Geschlecht und Navigationsstrategien im Labyrinth (Studie 2)	96
Tab. 18	Korrelation zwischen Strategiegruppe und Sexualhormonkonzentration (Studie 2)	96
Tab. 19	Deskriptive Statistiken der drei Navigationsstrategiefragebögen (Studie 2)	97
Tab. 20	Korrelationsmatrix: Zusammenhänge zwischen den einzelnen Subskalen der verschiedenen Strategiefragebögen (Studie 2)	98
Tab. 21	Ergebnisse der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen nach Geschlechtern (Studie 2)	99
Tab. 22	Ergebnisse der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit der verwendeten Strategie im Virtuellen Labyrinth (Studie 2)	100
Tab. 23	Aktivierete anatomische Strukturen bei Navigation, Männer > Frauen	105
Tab. 24	Aktivierete anatomische Strukturen bei Navigation, Frauen > Männer	105
Tab. 25	Aktivierete anatomische Strukturen bei Navigation, Externale Strategie > Internale Strategie	109
Tab. 26	Aktivierete anatomische Strukturen bei Navigation, Internale Strategie > Externale Strategie	109
Tab. 27	Regressionsanalyse für die Aktivierung in den <i>volumes of interest</i> der Frauen mit den Regressoren Östrogen und Progesteron	112
Tab. 28	Regressionsanalyse für die Aktivierung in den <i>volumes of interest</i> der Männer mit dem Regressor Testosteron	114
Tab. 29	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der Wahl einer bestimmten Navigationsstrategie im Labyrinth und der Wahl eines bestimmten Referenzsystems im Tunnel (Studie 3)	144
Tab. 30	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter (Studie 3)	145
Tab. 31	Kreuztabelle: Geschlecht und Navigationsstrategien im Labyrinth (Studie 3)	146

Tab.32	Ergebnisse der Selbsteinschätzung in den Fragebögen nach Geschlechtern (Studie 3)	146
Tab.33	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der Präferenz eines bestimmten räumlichen Referenzsystems in Bezug auf das Geschlecht	148
Tab.34	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Navigationsstrategiegruppen	149
Tab.35	Ergebnisse der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit der verwendeten Strategie im Virtuellen Labyrinth (Studie 3)	150
Tab.36	Deskriptive Statistiken Leistungsparameter nach Referenzsystem	151
Tab.37	Kreuztabelle: Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Referenzsystemgruppen	151
Tab.38	Ergebnisse der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit dem präferierten Referenzsystem im Tunnel	152
Tab.39	Ergebnisse für beide Navigationsstrategiegruppen auf den fünf Persönlichkeitsdimensionen des NEO-FFI	152
Tab.40	Gegenüberstellung von Literatur und Empirie bezüglich der Navigationsstrategien	159

1. Theoretisch-empirischer Hintergrund

1.1 Einführung

Dass Männer und Frauen sich in ihrem räumlichen Vorstellungsvermögen unterscheiden gilt als Allgemeingut. Tatsächlich zeigen sich reliable Unterschiede zwischen den Geschlechtern in räumlichen Aufgaben wie etwa der Mentalen Rotation. Dabei erbringen Männer konsistent bessere Leistungen. Auch in Orientierungs-, beziehungsweise Navigationsaufgaben machen Männer zum Teil weniger Fehler oder sind schneller. Hier zeigen sich jedoch nicht so konsistente Ergebnisse und die Unterschiede sind teilweise auch gering. Dennoch stellt sich die Frage, warum Männer und Frauen unterschiedliche Leistungen erbringen. Eine mögliche Interpretation ist, dass sie unterschiedliche Herangehensweisen, das heißt Strategien präferieren. Es ist dabei jedoch nicht klar, um welche Art von Strategien es sich handelt. Zwar finden viele Studien Unterschiede in der Strategiepräferenz zwischen Männern und Frauen, aber meistens werden diese Strategien nicht genau spezifiziert. Die Unterscheidung verschiedener Navigationsstrategien ist in der bisherigen Literatur unzureichend, inkonsistent und damit wenig zufriedenstellend (vgl. Abschnitt 1.3.3).

Ferner stellt sich die Frage, ob die Vorliebe für eine bestimmte Strategie allein am Geschlecht liegen kann. Es gibt Hinweise, dass unter anderem die Sexualhormone Testosteron, Östrogen und Progesteron die Leistungen bei räumlichen Aufgaben beeinflussen und auch die für diese verwendeten Strategien.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, Navigationsstrategien zu spezifizieren und deren bisherigen Konzeptualisierungen kritisch zu reflektieren. Eng damit verbunden ist die Frage nach Geschlechtsunterschieden in Navigationsleistung und -strategien und dem Einfluss von Sexualhormonen auf diese. Zur genaueren Charakterisierung und Spezifikation sind zudem die neuronalen Prozesse während der Navigation bei Männern und Frauen in Abhängigkeit von ihrer Strategie und ihrem Hormonhaushalt interessant. Zur Einführung in die Thematik werden im Folgenden wichtige Begriffe dargestellt. Als grundlegendster Begriff wird zunächst der der Raumkognition spezifiziert.

Raumkognition, räumliches Denken oder auch räumliches Vorstellungsvermögen kann generell als die Fähigkeit beschrieben werden in der Vorstellung räumlich zu sehen und zu denken. Diese Fähigkeit umfasst den Erwerb, die Organisation und den aktiven Umgang mit im Gedächtnis gespeicherten Vorstellungsbildern über räumliche Konstellationen (vgl. z.B. Maier, 1999).

Raumkognition ist insgesamt aber ein sehr umfangreiches und globales Konstrukt. Es besteht große Einigkeit darüber, dass es mit einem Generalfaktor nicht

umfassend beschrieben werden kann, sondern sich noch in weitere Unterfaktoren unterteilen lässt (vgl. Linn & Petersen, 1985; Allen, 1999; Newcombe, 2002; Maier, 1999; Thurstone, 1938). Bezüglich Art und Menge dieser Unterfaktoren besteht wiederum kaum Einigkeit. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem relevant, dass die meisten Autoren räumliche Orientierung neben zum Beispiel räumlichen Beziehungen oder Mentaler Rotation als wichtiges Unterkonstrukt der Raumkognition begreifen (z.B. Newcombe, 2002; Maier, 1999; Allen, 1999).

1.2 Räumliche Orientierung und Navigation

Der Begriff der räumlichen Orientierung ist von dem der räumlichen Navigation zu unterscheiden. Räumliche Orientierung bezeichnet die Ausrichtung eines Subjekts im Raum und die Wahrnehmung räumlicher Konfigurationen, sowie die Konstruktion räumlicher Repräsentationen (vgl. z.B. Maier, 1999; Peruch & Lapin, 1993). Räumliche Navigation stellt demgegenüber die aktive Anwendung des Orientierungsprozesses dar und enthält zusätzlich die gezielte, geplante Bewegung hin auf ein bestimmtes Ziel (z.B. Barkowsky, Knauff, Ligozat, & Montello, 2007). Während Orientierung ohne Navigation denkbar ist, ist Navigation ohne Orientierung nicht möglich. Orientierung ist vielmehr ein notwendiger Teil des Navigationsprozesses (vgl. Abb. 1). Räumliche Navigation ist immer zielgebunden, während räumliche Orientierung auch zielunabhängig und sogar hoch automatisiert stattfindet (vgl. z.B. May & Klatzky, 2000).

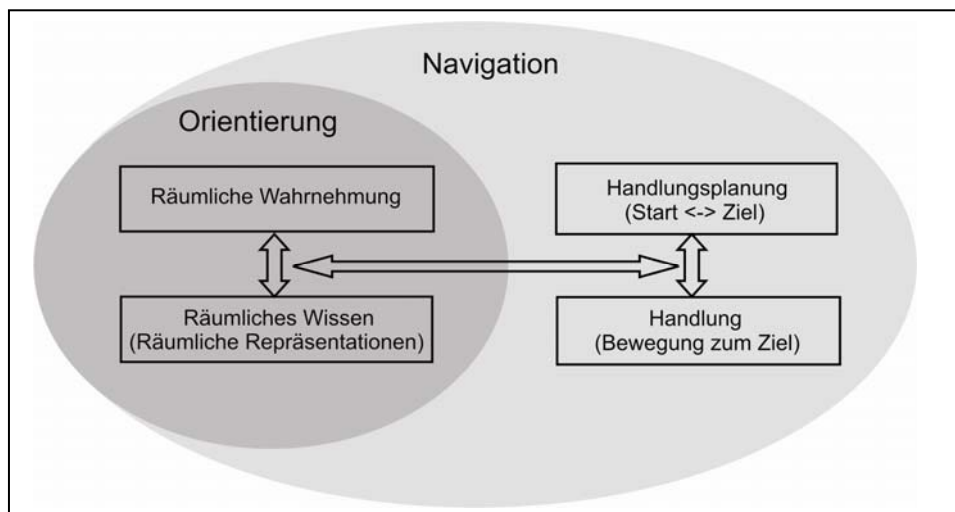


Abb.1: Verhältnis von räumlicher Orientierung zu räumlicher Navigation als Teilmenge von dieser. Darin enthalten sind die verschiedenen Subprozesse räumlicher Orientierung und Navigation (Abb. selbst).

Räumliche Orientierung und Navigation sind hoch komplexe Prozesse, denen jeweils weitere Subprozesse zugrunde liegen. Anhand neuropsychologischer Störungen kann man zum Beispiel auf mindestens drei unabhängige Subprozesse räumlicher

Orientierung schließen (vgl. Kerkhoff, 2006): a) Aufnahme und Integration räumlicher Informationen aus verschiedenen Modalitäten, b) Weiterverarbeitung räumlicher Informationen, c) Berechnung einer räumlichen Repräsentation der Umgebung. Ersterer Subprozess wurde in Abbildung 1 als räumliche Wahrnehmung klassifiziert, die letzten beiden wurden unter Räumlichem Wissen zusammengefasst.

Als Subprozesse der räumlichen Navigation benennen Barkowsky et al. (2007) Fortbewegung (*locomotion*) und Wegefinden (*wayfinding*). Wegefinden bedeutet das Erstellen eines Handlungsplanes, wie man vom Ausgangspunkt zum Ziel gelangt. Dies geschieht auch, wenn man diesen Weg noch nie beschritten ist und ihn sich vielmehr aufgrund des Wissens um die räumliche Umgebung erschließt. *Locomotion* stellt die eigentliche Bewegung zum Ziel hin dar (vgl. auch Abb. 1).

Räumliche Orientierung ist ebenso nicht das gleiche wie räumliches Gedächtnis. Es zeigt sich zum Beispiel, dass keine Interferenzen zwischen Orientierungsaufgaben und Tests zum räumlichen Gedächtnis, in denen zum Beispiel die Lokalisation von Objekten auf einem Tisch gelernt werden mussten, auftreten (vgl. Maguire, Burgess, & O'Keefe, 1999). Auch neuropsychologische Patienten mit Schwierigkeiten bei Orientierungsaufgaben können unbeeinflusst in ihren räumlichen Gedächtnisleistungen sein (z.B. Habib & Sirigu, 1987; McCarthy, Evans, & Hodges, 1996; Spiers, Burgess, Hartley, Vargha-Khadem, & O'Keefe, 2001).

Es findet sich eine allgemeine Problematik der adäquaten Operationalisierung räumlicher Orientierung und Navigation in der Literatur. Verschiedene Autoren wählen verschiedene Paradigmen, die nicht immer sauber zwischen Orientierung, Navigation und räumlichem Gedächtnis unterscheiden. Dies ist möglicherweise eine Ursache der zum Teil recht widersprüchlichen Forschungsergebnisse zu räumlicher Orientierung und Navigation im Gegensatz etwa zu Ergebnissen zur Mentalen Rotation (vgl. Abschnitt 1.4).

Die verwendeten Paradigmen lassen sich grob in 1. zweidimensionale Tests, 2. Orientierung in Mini-Welten, 3. Orientierung in realen Umgebungen und 4. Orientierung in virtuellen Umgebungen unterteilen. Zur ersten Art kann man solche Studien zählen, in denen Orientierung etwa anhand eines Stadtplans operationalisiert wird und die Probandinnen und Probanden (im Folgenden mit Pbn abgekürzt) auf diesem eine Route memorieren oder sich Objektlokationen merken müssen (z.B. Galea & Kimura, 1993; Dabbs, Chang, Strong, & Milun, 1998).

Eine weitere Möglichkeit der Messung von Orientierungs-, beziehungsweise Navigationsleistung ist das Navigieren durch Mini-Welten, wie zum Beispiel kleine

Labyrinth auf dem Tisch, die mit dem Finger nachgefahren werden müssen (z.B. Alvis, Ward, Dodson, & Pusakulich, 1990) oder Spielzeugstädten (z.B. Hund & Minarik, 2006).

Navigationsstudien in realen Umgebungen werden in der Regel in gut abgrenzbaren Umgebungen durchgeführt, wie zum Beispiel einem Gebäude (Blajenkova, Motes, & Kozhevnikov, 2005; Hölscher, Büchner, Meilinger, & Strube, 2007), aber auch in weniger abgegrenzten Umgebungen wie auf einem Universitätscampus (z.B. Saucier et al., 2002) oder entlang eines Straßenzuges (z.B. Ishikawa & Montello, 2006).

In jüngerer Zeit werden häufig virtuelle Realitäten bei der Erforschung menschlicher Navigationsleistungen eingesetzt. Eine virtuelle Realität (VR) ist eine computerbasierte, graphisch präsentierte, dreidimensionale Welt, welche die reale Welt repräsentieren soll und dem Nutzer möglichst erlaubt, mit dieser Welt so zu interagieren wie er es auch in der realen täte.

Im Rahmen der Navigationsforschung beim Menschen ist die virtuelle Variante einer Aufgabe verbreitet, die ursprünglich für die Untersuchung der Navigation bei Nagern erdacht wurde: das Morris-Wasserlabyrinth (MWM¹) (Morris, 1984). Bei dem MWM handelt es sich um kein Labyrinth im engeren Sinne, sondern um ein Wasserbecken mit etwa ein bis zwei Metern Durchmesser, meist gefüllt mit einer milchigen Flüssigkeit. Um dieses Becken herum stehen externe Hinweisreize, die von überall her einsehbar sind. In dieses Becken werden die Versuchstiere hineingesetzt, was für sie einen hoch aversiven Reiz darstellt. Aufgrund der trüben Färbung des Wassers können die Tiere eine unter der Wasseroberfläche verborgene Plattform nicht sehen, auf die sie sich retten können. Beim ersten Durchgang müssen die Tiere diese Plattform durch Versuch und Irrtum finden. Sie lernen im Folgenden durch negative Verstärkung recht schnell die Plattform direkt anzusteuern und sich somit erfolgreich im MWM zu orientieren.

Für den Menschen wird diese Aufgabe in eine virtuelle Realität übertragen, man spricht nun vom virtuellen Morris-Wasserlabyrinth (VMWM) (z.B. Driscoll, Hamilton, Yeo, Brooks, & Sutherland, 2005; Grön, Wunderlich, Spitzer, Tomczak, & Riepe, 2000; Sandstrom, Kaufman, & Huettel, 1998). Die Aufgabe die verborgene Zielplattform zu finden bleibt gleich.

Virtuelle Realitäten haben für die Erforschung menschlicher Orientierung und Navigation einige relevante Vorteile. Die wichtigsten sind ihre Kontrollierbarkeit und Manipulierbarkeit (vgl. z.B. Moffat, Zonderman, & Resnick, 2001; Burgess, Maguire, & O'Keefe, 2002). Virtuelle Realitäten garantieren etwa für alle Pbn den gleichen visuellen

¹ von englisch: *Morris Water Maze*

Input. Sie können darüber hinaus beliebig manipuliert werden, zum Beispiel durch undenkbar räumliche Verzerrungen oder Versetzen von Landmarken. Für die Untersuchung neuronaler Aktivierungen zum Beispiel mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI) stellen virtuelle Realitäten zudem die einzige Möglichkeit einer Operationalisierung dar. Die Orientierung in virtuellen Realitäten ist prinzipiell vergleichbar mit der in realen Umwelten (vgl. z.B. Ruddle, Payne, & Jones, 1997). Darum eignen sich virtuelle Realitäten insgesamt sehr gut zur experimentellen Untersuchung räumlicher Navigation.

Aufgrund der verschiedenen Operationalisierungen räumlicher Navigation und Orientierung und damit verbunden verschiedener Begrifflichkeiten gibt es im Rahmen der Navigationsforschung und gerade zu Geschlechtsunterschieden wenig allgemeine und konsistente Ergebnisse wie in den folgenden Absätzen gezeigt werden wird.

1.3 Strategien räumlicher Navigation

Im Folgenden werden verschiedene Navigationsstrategien beschrieben. Hierfür werden zunächst wichtige Begrifflichkeiten eingeführt. Dazu wird als erstes die Unterscheidung in verschiedene räumliche Referenzsysteme dargestellt und anschließend die verschiedenen Arten räumlicher Wissensrepräsentation erläutert.

1.3.1 Räumliche Referenzsysteme

Ein räumliches Referenzsystem (*frame of reference*) ist vereinfacht ausgedrückt ein Hilfsmittel zur Lokalisierung von Objekten im Raum (Klatzky, 1998), ähnlich einem Koordinatensystem. Man unterscheidet dabei primär egozentrische und allozentrische Referenzsysteme.

In einem egozentrischen² Referenzsystem werden Objekte in Relation zum beobachtenden oder sich bewegenden Individuum repräsentiert. Das Individuum ist der Ursprung, das Zentrum des Referenzsystems, dessen Ausrichtung somit ebenfalls vom Individuum abhängt und sich mit dessen Bewegung verändert. Eine egozentrische Repräsentation ist vor allen Dingen dann funktional, wenn die Individuum-Objekt-Relationen konstant bleiben oder zum Beispiel keine weiteren Informationen als die eigene Bewegung und Ausrichtung zur Verfügung stehen, zum Beispiel in Dunkelheit, der Wüste oder auf hoher See (vgl. Newcombe, 2002). Dann dienen vor allem Informationen über den so genannten Heimkehrvektor (*homing vector*) oder die so

² Ego = griechisch für ich, selbst

genannte Koppelnavigation (*dead reckoning*) als Orientierungs-, beziehungsweise Navigationshilfe.

Unter dem Heimkehrvektor versteht man das Wissen darum, wo sich von der aktuellen Position aus in Luftlinie der Punkt, von dem aus man gestartet ist, befindet. Dieses Wissen erlaubt es, unabhängig von der zurückgelegten Route, einen direkteren Weg zum Heimkehren, das heißt zur Rückkehr zum Startpunkt einzuschlagen.

Koppelnavigation ist ein Begriff, der ursprünglich aus der Nautik stammt. Darunter versteht man den Prozess der Ortsschätzung (Ortung) unter Einbezug der Bewegungsrichtung (Kurs), der Geschwindigkeit, der Zeit und der zurückgelegten Distanz. Damit in engem Zusammenhang und zum Teil synonym gebraucht steht der Begriff der Pfadintegration (*path integration*). Dieser umschreibt den Prozess der Positionsbestimmung auf der Basis propriozeptiver, das heißt kinästhetischer und vestibulärer Reize (May & Klatzky, 2000).

Innerhalb eines allozentrischen³ Referenzsystems werden Objekte im Gegensatz zum egozentrischen in Relation zu anderen objektiven Positionen in einem konstanten externen Bezugsrahmen repräsentiert. Die Repräsentation der Objektlokationen ist somit unabhängig vom beobachtenden Individuum und es müssen weniger Aktualisierungen vorgenommen werden.

Neben den oben bereits erläuterten Begriffen der Pfadintegration oder Koppelnavigation sind noch Begriffe wie Wegleitung (*guidance*) und Routenfolgen (*route following*) im Rahmen räumlicher Navigation wichtig. Mit Wegleitung ist gemeint, dass eine markante, weithin sichtbare Landmarke das Ziel markiert und so zu diesem hinleitet. Beim Routenfolgen nutzt man dagegen allenfalls Informationen über Landmarken, die den Weg markieren, und über Abbiegungen, Kreuzungen und ähnliches.

Bezüglich der Frage, wann ein egozentrisches und wann ein allozentrisches Referenzsystem genutzt wird, gibt es einige Unklarheiten in der Literatur. Zum Beispiel wird in der Regel davon ausgegangen, dass Routenfolgen egozentrisch ist. Das ist zwar insofern nachvollziehbar als dabei die eigene Bewegung entlang der Route und die eigenen Drehungen bei Abzweigungen relevante Informationsquellen darstellen. Allerdings sind Informationen über Landmarken und ihr Verhältnis zueinander wiederum in einem allozentrischen Referenzsystem lokalisiert. Dies zeigt, dass die beiden Referenzsysteme nicht immer klar voneinander abgrenzbar sind. Wie weiter unten noch

³ allo = griechisch für fremd

deutlicher gezeigt werden wird, führt dies im Zusammenhang mit Navigationsstrategien zu unscharfen Unterscheidungen.

Es gibt aber Hinweise darauf, dass das egozentrische und allozentrische System funktional unabhängig voneinander sind (z.B. Woodin & Allport, 1998; Pizzamiglio, Guariglia, & Cosentino, 1998; Hillis et al., 2005; Ota et al., 2003). Dennoch müssen sie miteinander interagieren: Egozentrische Repräsentationen sind günstig für das Kurzzeitgedächtnis und eine aktuelle Verhaltenskontrolle. Allozentrische Repräsentationen sind dagegen günstiger für das Langzeitgedächtnis, vor allem da Lage und Ausrichtung des Individuums zwischen Präsentation und Abruf variieren können. Für eine allozentrische Repräsentation räumlicher Strukturen müssen die perzeptuellen Informationen abstrahiert werden. Die komplexe kognitive Leistung besteht darin, den visuellen, egozentrischen Input ebenso egozentrisch im Kurzzeitgedächtnis zu speichern, dann aber in eine allozentrische Langzeitrepräsentation zu übersetzen. Für die Navigation muss diese allozentrische Repräsentation wieder in einen egozentrischen Output überführt werden (vgl. Burgess, 2006). Das heißt, dass eine allozentrische ohne vorher gehende egozentrische Repräsentation nur mittels etwa eines Stadtplanes denkbar ist, während das egozentrische Referenzsystem vom allozentrischen unabhängig ist. Untersuchungen bestätigen, dass eine Störung des egozentrischen Systems auch das allozentrische System beeinflusst. Eine Störung des allozentrischen Systems lässt das egozentrische demgegenüber unbeeinflusst (Ratcliff, 1991).

Insgesamt kann man festhalten, dass die Unterscheidung in ein allozentrisches und ein egozentrisches Referenzsystem im Rahmen der räumlichen Orientierung und damit auch Navigation sinnvoll ist. Allerdings ist diese Unterscheidung oftmals unscharf. Hinzu kommt, dass es zwar für das Langzeitgedächtnis günstiger erscheint allozentrisch zu repräsentieren. Es wird aber oft davon ausgegangen, dass es räumliche Repräsentationen auch im Langzeitgedächtnis gibt, die nicht allozentrisch repräsentiert sind, wie etwa das so genannte Routenwissen. Welche Unterscheidungen räumlicher Repräsentationen im Langzeitgedächtnis diskutiert werden und in welchem Zusammenhang dazu die räumlichen Referenzsysteme stehen sollen, wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

1.3.2 Räumliche Repräsentationen

Eine geläufige Unterscheidung im Kontext der Repräsentation räumlichen Wissens stellt die Unterscheidung in Landmarken-, Routen- und Überblickswissen dar. Diese Unterscheidung geht auf Siegel und White (1975) zurück, die ein Entwicklungsmodell

räumlichen Wissens aufstellten. Siegel und White gingen davon aus, dass sich das Wissen um eine Umgebung auf drei Stufen entwickelt: Zunächst entwickeln Menschen ein grobes Wissen über die Identität markanter Punkte in ihrer Umgebung, die in ungefähre Beziehung zueinander stehen, das heißt Landmarkenwissen. Anschließend lernen sie diese Beziehungen besser kennen und entwickeln ein Wissen über die Verbindungen dieser Landmarken, wissen nun also von Routen, die die Landmarken miteinander verbinden. Irgendwann ist ihr Wissen um die verschiedenen Routen so komplex, dass sie auch wissen, dass sich Routen überschneiden können und so entwickeln sie ein mentales Routennetz, eine Art Karte ihrer Umgebung, die Siegel und White dann in ihrer vollen Entfaltung Konfigurations-, das heißt Überblickswissen nennen (Siegel & White, 1975). Diese Stufenabfolge ist insgesamt vermutlich zu einfach. Dennoch stellt das Modell eine recht hilfreiche und anschauliche Unterscheidungshilfe räumlicher Repräsentationsarten dar, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Landmarkenwissen stellt lediglich nicht-relationales Wissen um vorhandene Objekte in der Umgebung dar und enthält allenfalls basale Informationen über Entfernungen zwischen diesen (Siegel & White, 1975; Herrmann, Schweizer, Janzen, & Katz, 1998). Landmarkenwissen alleine ermöglicht keine erfolgreiche Navigation, da es praktisch keine räumlichen und Distanzinformationen enthält. Sollte man mit bloßem Landmarkenwissen eine Karte zeichnen, müssten sich zufällig angeordnete Punkte auf dem Papier ergeben (Ishikawa & Montello, 2006). Ein erfolgreiches Navigieren ist somit mit reinem Landmarkenwissen allenfalls Zufall. Man muss zusätzlich wissen, wie die Objekte miteinander verbunden sind, um sich zielführend in der Umgebung zu bewegen. Eine Ausnahme dieser Regel stellt die Wegleitung dar. Da Landmarkenwissen somit kein räumliches Wissen im engeren Sinne darstellt, sind einige Autoren auch der Ansicht, dass Landmarkenwissen allenfalls eine Vorstufe des Routenwissens darstellt (Herrmann et al., 1998), beziehungsweise lediglich die Bausteine bereit stellt für die Vernetzung auf höheren Wissensstufen (Werner, Saade, & Lüer, 1998).

Routenwissen ist zielgerichtet und gilt als ein zeitlich-räumliches Sequenzwissen wie es beim Abschreiten einer Route erlebt wird (vgl. Wolbers, Weiller, & Buchel, 2004; Werner, Krieg-Brückner, Mallot, Schweizer, & Freksa, 1997; Herrmann et al., 1998). Routenwissen ist abhängig von der Lernrichtung, das heißt wenn Pbn die Route von A nach B gelernt haben, können sie oft nicht den Umkehrschluss ziehen und auch den Weg von B nach A reproduzieren (Schweizer, Herrmann, Janzen, & Katz, 1998).

Überblickswissen ist demgegenüber eine zielunabhängige Repräsentation. Es gilt als ebenso unabhängig von der eigenen Person (vgl. Wolbers et al., 2004) und ist deshalb

eng mit den Begriffen der kognitiven Landkarte (s.u.) und des allozentrischen Referenzsystems verbunden. Überblickswissen ist von spezifischen Sequenzen (Routen) abstrahiert und das Wissen aus verschiedenen Erfahrungen ist darin in ein Einzelmodell integriert (Werner et al., 1997). Synonym verwendete Bezeichnungen für Überblickswissen sind Konfigurationswissen (z.B. Siegel & White, 1975) oder Orientierungswissen (z.B. Lawton, 1994).

Routenwissen wird von Überblickswissen oft nach folgenden Aspekten unterschieden: 1. Es handelt sich um sequentielles Wissen, 2. die Anzahl der Wege ist begrenzt, 3. es basiert auf einem egozentrischen Bezugssystem (Werner et al., 1997). Ferner handelt es sich um so genanntes nicht-metrisches⁴ Wissen (Ishikawa & Montello, 2006), das heißt es stellt keine hinreichenden Distanzinformationen zur Verfügung. Dass diese Unterscheidung so nicht immer zutreffend ist, wird weiter unten deutlich.

Die Stufen des Modells von Siegel und White sind nicht immer klar abgrenzbar. Deshalb kann es auch allenfalls als Rahmenmodell angesehen werden, da es nur eine generelle Beschreibung der Entwicklungsrichtung angibt. Als solches ist es jedoch sehr hilfreich. Es macht aber zum Beispiel keine Angaben darüber, wie viel Zeit oder Aufwand zum Erreichen einer höheren Stufe benötigt wird (Ishikawa & Montello, 2006; Blades, 1991) oder wann die nächsthöhere Stufe als erreicht gelten kann. Vor allem aber wird die Unterteilung in allenfalls drei Stufen der Komplexität räumlicher Repräsentationen sicher nicht gerecht. Dennoch gehen auch heute noch viele Autoren über diese drei Stufen nicht hinaus oder spezifizieren diese wenigstens genauer. Eine erfreuliche Ausnahme stellt die Arbeit von Herrmann et al. (1998) dar. Die Autoren formulieren darin empirisch noch zu prüfende theoretisch-konzeptuelle Annahmen über zum Beispiel diskriminative Merkmale von Routen- und Überblickswissen.

Herrmann et al. (1998) unterscheiden nicht nur zwischen Routen- und Überblickswissen, sondern differenzieren beide Wissensarten noch weiter aus (vgl. Abb.2). So nehmen sie an, dass es drei Arten von Routenwissen gibt, die auf unterschiedlichen Verarbeitungsebenen und durch die Art der weiteren Verarbeitung spezifiziert sind und die sie mit arabischen Ziffern indizieren. Routenwissen¹ stellt dabei die elementarste Form von Routenwissen dar und ist praktisch nicht elaboriert. Auf

⁴ Metrisch ist im mathematischen Sinne gemeint. Eine Metrik ist eine mathematische Funktion, die je zwei Elementen eines Raums einen nicht negativen reellen Wert zuordnet. Dieser Wert ist der Abstand der beiden Elemente zueinander. Bei Routenwissen ist dieser Abstand als Information irrelevant, man muss lediglich wissen, dass man den Weg von A zu B zu C ablaufen muss. Beim Überblickswissen müssen die Abstände zwischen den Elementen, das heißt etwa den Landmarken jedoch zumindest annähernd bekannt sein, da man sonst nicht nach geometrischen Richtlinien Vektoren schätzen kann, die einem ermöglichen, zum Beispiel eine Abkürzung zwischen A und C einzuschlagen.

dieser Ebene ist das Subjekt nicht in der Lage das Wissen um die Route zu abstrahieren und kann darum zum Beispiel nicht von der Route $A \rightarrow B$ auf die Route $B \rightarrow A$ schließen.

Auf einer nächsten Ebene können die Bewegungen zum Ziel B durch das Lernen von rein logischen Inversions- beziehungsweise Vertauschungsoperationen umgekehrt werden und ein Zurückfinden wird nun induktiv möglich. Durch das Anwenden dieser Operationen bleibt die Perspektive der gelernten Route und somit auch des Routenwissens¹ bestehen, das heißt Routenwissen² wird aus der Sicht des Navigierers repräsentiert, so wie er sie auch beim Ablaufen sehen würde. Diese Perspektive nennen Herrmann et al. (1998) die Feldperspektive (F-Perspektive). Neben der Elaboration über Inversionsoperationen ist es aber auch möglich die Perspektive in der Repräsentation zu ändern, sich mental also aus der Sicht des Navigierers heraus zu begeben und vielmehr die Perspektive eines externen Beobachters einzunehmen, der zum Beispiel aus der Vogelperspektive auf die gelernte Route blickt. Diese Perspektive nennen Herrmann et al. (1998) die Beobachterperspektive (B-Perspektive). Aus der B-Perspektive heraus liegt das Wissen um Landmarken nicht mehr sequentiell, sondern vielmehr simultan vor: Bei der „B-Perspektive ‚liegt das Postamt rechts vom Rathaus‘, statt daß es ‚vor dem Rathaus kommt‘“ (Herrmann et al., 1998, S. 153). Aus einer solchen Umkodierung der Perspektive folgt eine andere Art des Routenwissens, das Routenwissen³. Dies ist deswegen bemerkenswert, weil viele Autoren davon ausgehen, dass die Transformation oder Rekodierung in eine B- oder eben allozentrische Perspektive gleich bedeutend ist mit der Überführung in Überblickswissen.

Je nach Verarbeitung oder Elaboration des Routenwissens¹ entstehen also auf der nächsten Verarbeitungsebene zwei unterschiedliche Arten von Routenwissen (vgl. Abb.2). Aus diesen beiden Wissensrepräsentationen entwickeln sich vermutlich auch verschiedene Überblickswissen. Dabei ist Überblickswissen definiert als die Integration mehrerer mental repräsentierter Routen innerhalb einer Umgebung.

Herrmann et al. (1998) unterscheiden drei Arten von Überblickswissen. Überblickswissen₁ entsteht direkt aus Routenwissen². Es ist die Integration mehrerer Routen in der F-Perspektive, die sich punktuell berühren oder überlappen. Überblickswissen₁ gilt als erreicht, wenn man problemlos von einer Route auf eine andere wechseln kann. Die weiteren Arten von Überblickswissen ergeben sich demgegenüber aus Routenwissen³, und liegen somit in der B-Perspektive vor. Die Konzeption von Herrmann et al. (1998) ist überblicksartig Abbildung 2 zu entnehmen.

Diese Überlegungen zeigen, dass etwa auch die oft gemachte Behauptung, Routenwissen basiere auf einem egozentrischen Referenzsystem, Überblickswissen auf

einem allozentrischen (z.B. Gramann, Muller, Eick, & Schonebeck, 2005; Werner et al., 1997) nicht zwingend und viel zu vereinfachend ist. Es kommt vielmehr auf die Perspektive an. Die F-Perspektive ist etwa mit einem egozentrischen Referenzsystem vergleichbar, die B-Perspektive mit einem allozentrischen.

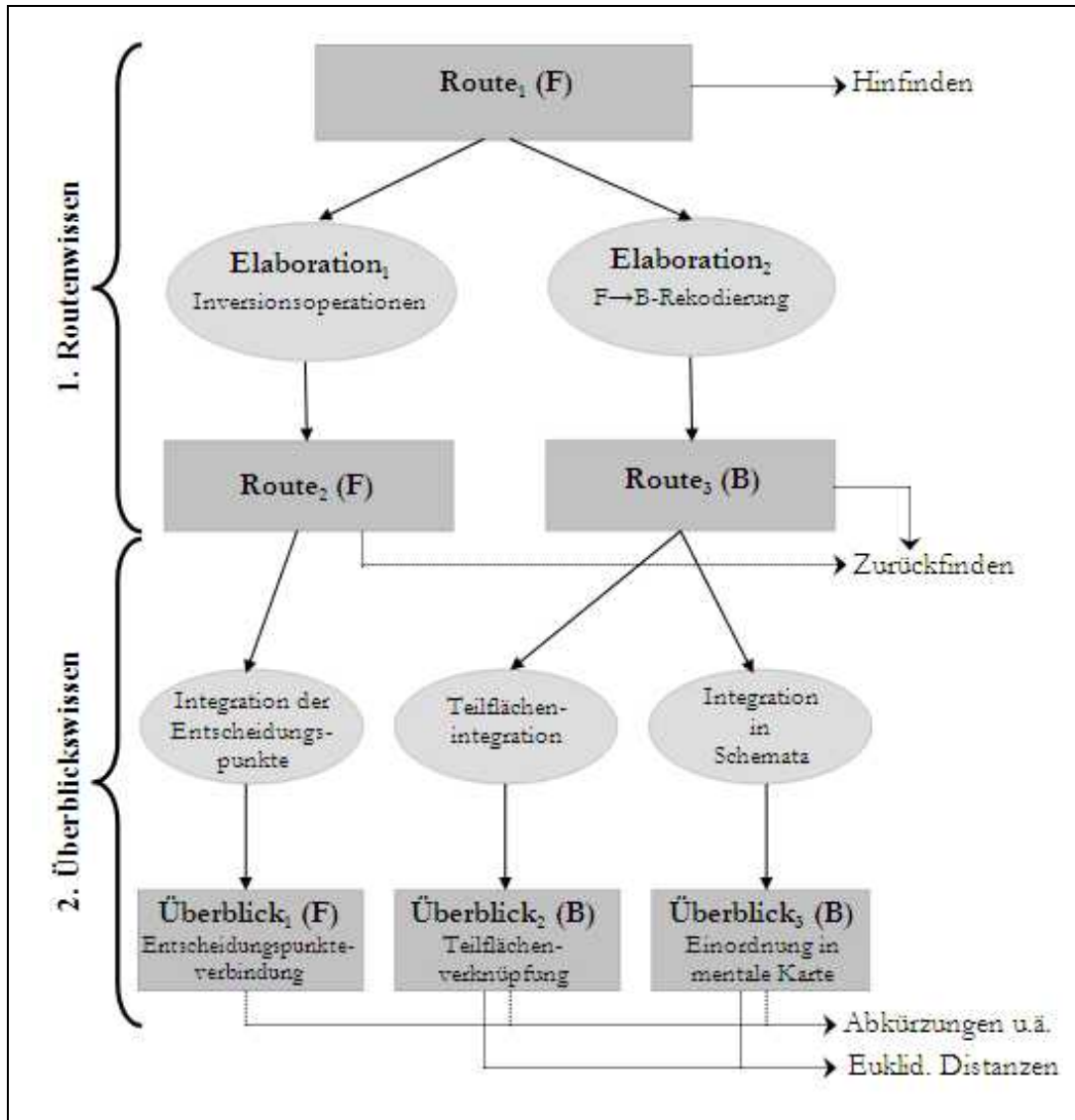


Abb.2: Routen- und Überblickswissen nach den konzeptuellen Überlegungen von Herrmann et al. (1998). Die Autoren gehen davon aus, dass es zwei Perspektiven innerhalb einer räumlichen Repräsentation gibt, die Feld-Perspektive (F) und die Beobachter-Perspektive (B). Je nach Verarbeitung des erworbenen Routenwissens ergeben sich unterschiedliche elaborierte Routenrepräsentationen und daraus auch unterschiedliche Überblicksrepräsentationen (Abbildung nach Herrmann et al., 1998).

Auch Gillner und Mallot (1998) meinen aus ähnlichen Überlegungen heraus, dass Routen- und sogar Landmarkenwissen sowohl egozentrisch als auch allozentrisch repräsentiert werden kann (vgl. Abschnitt 4.4).

Wie oben bereits erwähnt ist vor allem mit dem Begriff des Überblickswissens auch der Begriff der so genannten kognitiven Landkarte (*cognitive map*) verbunden,

weswegen dieses Konstrukt ebenfalls kurz erläutert wird. Dieses geht zurück auf Tolman (1948), der das Wegfinden von Ratten in Labyrinthen untersuchte und deutlich machte, dass der Orientierung mentale Prozesse zugrunde liegen müssen. Dies war zu Zeiten des damals vorherrschenden Behaviorismus revolutionär. Tolman definierte die kognitive Landkarte als eine Repräsentation der Umgebung, welche Routen, Wege und Beziehungen in der Umgebung abbilden. Diese nutzt ein Tier, um Entscheidungen darüber zu fällen, wohin es sich bewegen soll. Die kognitive Landkarte ist demnach ein profundes mentales Abbild der Umgebung.

Auch für Menschen ist die kognitive Landkarte ein sehr anerkanntes Konstrukt, wengleich die Ansichten über die Art der kognitiven Landkarte stark variieren. Die Vorstellung reicht von einem rein hypothetischen Konstrukt über eine Metapher bis hin zu einem analogen Modell (vgl. Golledge, 1999).

Die kognitive Karte als zielungebundene Repräsentation stellt am ehesten das dar, was man unter Überblickswissen verstehen würde: ein profundes Abbild über räumliche Verbindungen und Beziehungen, unabhängig davon, ob und welches Ziel man ansteuern will.

Es sollte in diesem Abschnitt deutlich geworden sein, dass es die Begriffe des Landmarken-, Routen- und Überblickswissens, beziehungsweise der kognitiven Landkarte als mögliche Unterscheidungen räumlicher Repräsentationen gibt. Es gibt aber bisher wenige Arbeiten, die ernsthaft versuchen über das sehr einfache Modell von Siegel und White hinaus zu gehen und die Beschaffenheit der Repräsentationsarten näher zu spezifizieren. Vielmehr wird oft einfach festgestellt, Routenwissen werde egozentrisch repräsentiert, Überblickswissen allozentrisch. Das ist deswegen ein kritischer Punkt, weil gerade diese Begriffe in vielen Arbeiten als Grundlage für die Unterscheidung räumlicher Navigationsstrategien herangezogen werden. Dies wird im folgenden Abschnitt deutlich werden.

1.3.3 Navigationsstrategien

Strategien sind grob gesagt zielbezogene Situations-Handlungs-Verknüpfungen. Da kognitive Prozesse hochkomplex sind, ist diese Definition sehr vereinfachend und es sind näher gehende Kategorisierungen möglich und sinnvoll. Für die vorliegende Arbeit soll es genügen Strategien als durch bestimmte Situationsmerkmale, zum Beispiel eine räumliche Umgebung, angestoßene, aus dem kognitiven Repertoire abgerufene und auf ein Ziel gerichtete Handlungsfolgen zu verstehen (vgl. Reusser, 1998).

Es besteht in der Literatur eine große Übereinstimmung in der Annahme, dass es unterschiedliche Strategien räumlicher Navigation gibt. Wie diese zu unterscheiden sind, ist dagegen nicht ganz so einheitlich. Zur Differenzierung von Navigationsstrategien werden oft die oben beschriebenen Repräsentationsarten räumlichen Wissens herangezogen oder die räumlichen Referenzsysteme. Oft hängt die Unterscheidung auch von der Art der Operationalisierung ab.

Lawton unterscheidet zum Beispiel zwei räumliche Strategien: Routen- und Orientierungsstrategie (z.B. Lawton, 1994; Lawton, 1996). Diese Unterscheidung referiert offensichtlich auf die oben beschriebenen räumlichen Repräsentationen, das heißt auf die primäre Verwendung von Routenwissen gegenüber Orientierungs-, also Überblickswissen während räumlicher Navigation (Lawton, 1994). In ihren Studien verwendet Lawton vor allem einen selbst entwickelten und durch Faktorenanalysen untermauerten Fragebogen zur Erfassung dieser beiden Strategien, die *Wayfinding Strategy Scale* (Lawton, 1994).

Eine weitere Unterscheidung räumlicher Navigationsstrategien, die sich ebenfalls auf die unterschiedlichen Arten der Repräsentationen bezieht, ist die in Landmarken-, Routen- und Überblicksstrategie (vgl. z.B. Pazzaglia & De Beni, 2001; Denis, Pazzaglia, Cornoldi, & Bertolo, 1999; Pazzaglia & De Beni, 2002). Die Arbeitsgruppe um Pazzaglia entwickelte auf Grundlage dieser drei angenommenen Strategien räumlicher Orientierung ebenfalls einen Fragebogen (Pazzaglia, Cornoldi, & De Beni, 2000; Pazzaglia & De Beni, 2001), den Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (*Questionnaire on Spatial Representations*). Die fünf Skalen dieses Fragebogens wurden wie bei Lawton faktorenanalytisch gebildet. Sie bilden neben den drei eben genannten Strategien noch den allgemeinen Orientierungssinn (*sense of direction*) und eine Richtungsstrategie ab. Der Orientierungssinn stellt eine allgemeine Fähigkeit zur räumlichen Orientierung unabhängig von der verwendeten Strategie dar. Die Richtungsstrategie ist charakterisiert durch die Nutzung kardinaler Richtungen wie Westen oder Osten (vgl. Pazzaglia & De Beni, 2001). Eine deutsche Übersetzung dieses Fragebogens liegt vor, befindet sich aber noch in der Validierungsphase (vgl. z.B. Münzer, 2007, und Abschnitt 3.2.4.2).

Neben der Operationalisierung über Fragebögen werden Navigationsstrategien oftmals über die Art der Informationsdarbietung unterschieden. Shelton und Gabrieli (2002) gehen zum Beispiel davon aus, dass die Informationspräsentation einen direkten Einfluss auf die anschließende Wissensrepräsentation hat. Die Autoren nehmen an, dass ein Lernen innerhalb einer Umgebung aus der Ersten-Person-Perspektive Routenwissen

erzeugt, Lernen aus der Vogelperspektive oder mittels einer Karte dagegen Überblickswissen.

Hartley, Maguire, Spiers und Burgess (2003b) operationalisieren in ihrer Studie unterschiedliche Strategien ebenfalls über die Art der Informationspräsentation. So unterschieden sie zwischen *wayfinding* und *route-following*. Die Gruppe derjenigen, welche in einer virtuellen Stadt eine *wayfinding*-Aufgabe bewältigen mussten, durften in der Lernphase die Umgebung frei explorieren, was nach Ansicht der Autoren zu Überblickswissen führt. Die Gruppe derjenigen, die eine *route-following*-Aufgabe erhielten, lernten in der vorgehenden Lernphase immer wieder diese spezifische Route abzulaufen, was zu Routenwissen führen soll und nicht zu Überblickswissen (Hartley et al., 2003b).

Die Annahme, dass die Art der Darbietung die Strategie direkt determiniert, ist mit dem Begriff der Strategie streng genommen nicht kompatibel. Strategien zu unterscheiden und verschiedenen Personengruppen unterschiedliche Strategiepräferenzen zu unterstellen macht nur dann Sinn, wenn man annimmt, dass eben nicht jeder in der Erste-Person-Perspektive nahezu automatisch das gleiche Vorgehen wählt und die gleiche räumliche Repräsentation aufbaut. Deswegen kann die soeben beschriebene Art der Operationalisierung nur bedingt Aufschluss über die Beschaffenheit räumlicher Navigationsstrategien geben.

Gerade in Studien, die eine verhaltensexperimentelle Strategieunterscheidung zur Grundlage haben, werden oftmals eine Ortsstrategie (*Place Strategy*) und eine Reiz-Reaktions-Strategie (*Response Strategy*) unterschieden, sowohl im Tierexperiment (vgl. z.B. Korol, Malin, Borden, Busby, & Couper-Leo, 2004) als auch im Humanexperiment (Schmitzer-Torbert, 2007; Iaria, Petrides, Dagher, Pike, & Bohbot, 2003; Levy, Astur, & Frick, 2005). Eine *Place Strategy* stellt dabei eine Strategie dar, bei der externe Hinweisreize oder Landmarken als Orientierungshilfe verwendet werden. Bei der Anwendung einer *Response Strategy* wird sich demgegenüber der Weg oder die Route zum Ziel gemerkt, unabhängig von externen Reizen (vgl. Abschnitt 1.5.3).

Eine weitere verbreitete Unterscheidung von Navigationsstrategien ist die in egozentrische und allozentrische Strategien (vgl. z.B. Jordan, Schadow, Wüstenberg, Heinze, & Jäncke, 2004; Kealy et al., 2008; Korol, 2004). Diese Unterscheidung bezieht sich auf die verwendeten räumlichen Referenzsysteme (vgl. Abschnitt 1.3.1) während der Navigation und wird oft mit der in Routen- und Überblicksstrategie vermischt, beziehungsweise mit dieser gleich gesetzt. Dabei wird die Routenstrategie als eine egozentrische, die Überblicksstrategie als eine allozentrische Strategie begriffen (z.B. Gramann et al., 2005).

Die verhaltensexperimentell unterschiedenen Strategien *Place* und *Response Strategy* werden ebenfalls oft mit egozentrischer oder allozentrischer Strategie gleich gesetzt. Dabei wird die *Place Strategy* als eine allozentrische, die *Response Strategy* als eine egozentrische Strategie klassifiziert. Die *Place Strategy* habe objektive Referenzpunkte wie die externen Hinweisreize als Orientierungsgrundlage. Die *Response Strategy* basiere auf der Bewegung des Individuums und sei damit betrachterabhängig (vgl. z.B. Korol et al., 2004; Korol, 2004; Zurkovsky, Brown, Boyd, Fell, & Korol, 2007; Schmitzer-Torbert, 2007; deIpolyi et al., 2008).

Wie oben bereits kurz dargestellt sind einige Autoren geneigt auch Routen- und Überblickswissen nach egozentrisch und allozentrisch zu klassifizieren, was offensichtlich zu einfach ist (vgl. Abschnit 1.3.2). Es ist deswegen zu vermuten, dass auch die Einteilung von *Place* und *Response Strategy* nach den Referenzsystemen etwas zu kurz greift. Es ist schließlich nicht gesagt, dass ein Pb mit einer *Place Strategy* nicht auch eine F-Perspektive einnehmen kann oder jemand mit einer *Response Strategy* eine B-Perspektive.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass es kein einheitliches Verständnis von Orientierungs-, beziehungsweise Navigationsstrategien in der Literatur gibt, vermutlich auch deshalb nicht, weil während räumlicher Navigation eine Vielzahl von Subprozessen ablaufen (s.o., Abb.1). Diese können nicht so allgemein in eine einheitliche Strategie eingeteilt werden. Es ist in den verschiedenen Arbeiten nicht immer ganz klar, an welchem Punkt des Navigationsprozesses die von den Autoren genannten Strategien ansetzen. Dies ist meines Erachtens einer von mehreren Gründen für die begrifflichen Unterschiede in den verschiedenen Arbeiten bezüglich räumlicher Navigationsstrategien. Auch wird in vielen Arbeiten pauschal von Routen- und Überblicksstrategie gesprochen ohne diese wirklich klar zu spezifizieren, zum Beispiel anhand der recht detaillierten konzeptuellen Überlegungen von Herrmann et al. (1998) zu Routen- und Überblickswissen.

Es ist ein Ziel dieser Arbeit, die bisherigen, vielfältigen Vorstellungen zu Navigationsstrategien kritisch zu hinterfragen und empirische Befunde zu liefern, die vor allem in Bezug auf die verhaltensexperimentell gefundenen Strategien *Place* und *Response Strategy* für inhaltliche Klarheit sorgen sollen.

Nachdem nun erläutert wurde, dass es unterschiedliche Navigationsstrategien gibt, eröffnet sich die Frage, welche Faktoren die naive Präferenz für bestimmte Strategien beeinflussen. Im Zusammenhang mit kognitiven Leistungen allgemein werden das Geschlecht, aber auch spezifischer die in den Geschlechtern unterschiedlich hoch

konzentrierten Sexualhormone als Teilverursacher für unterschiedliche Leistungen und Strategien diskutiert. In den folgenden Abschnitten wird dies genauer betrachtet, sowie konkret in Bezug zu räumlichen Navigationsleistungen und –strategien gebracht.

1.4 Geschlecht und räumliche Navigation

1.4.1 Geschlechtsunterschiede in räumlichen Aufgaben

Unterschiedliche Leistungen in räumlichen Aufgaben gehören zu den wohl deutlichsten und reliabelsten kognitiven Geschlechtsunterschieden zugunsten von Männern (vgl. zum Überblick z.B. Kimura, 1999; Kimura, 2004; Linn & Petersen, 1985; Weiss, Deisenhammer, Hinterhuber, & Marksteiner, 2005; Hausmann, 2007).

Allerdings erbringen Männer nicht in allen räumlichen Aufgaben gleichermaßen bessere Leistungen als Frauen. Am robustesten sind die Ergebnisse diesbezüglich bei Aufgaben zur Mentalen Rotation (vgl. z.B. Linn & Petersen, 1985; Voyer, Voyer, & Bryden, 1995; Peters et al., 1995), wohingegen die Unterschiede bei räumlicher Wahrnehmung und Visualisierung deutlich unklarer sind (Linn & Petersen, 1985). Auch bei Aufgaben zur räumlichen Orientierung sind die Geschlechtsunterschiede nicht durchgehend und konsistent wie im nächsten Abschnitt gezeigt werden wird.

1.4.2 Geschlecht und Leistung in Navigationsaufgaben

Männer scheinen insgesamt besser in Orientierungs- und Navigationsaufgaben zu sein als Frauen, das heißt sie machen weniger Fehler in Navigationsaufgaben oder lösen diese schneller. Es wird zwar nicht in jeder Studie immer ein solcher Männervorteil gegenüber Frauen gefunden, allerdings findet sich demgegenüber in keiner Studie ein Frauenvorteil (für einen Überblick vgl. Coluccia & Louse, 2004).

Coluccia und Louse (2004) fassen zusammen, dass Geschlechtsdifferenzen anhand von zweidimensionalen Tests wie dem Lernen einer Route auf einem Stadtplan (z.B. Galea & Kimura, 1993) relativ gering ausfallen. In virtuellen und realen Umgebungen zeigen sich dagegen stabilere Geschlechtsunterschiede. Am häufigsten werden Geschlechtsunterschiede in interaktiven virtuellen Umgebungen gefunden, zum Beispiel dem Morris-Wasserlabyrinth, am seltensten in virtuellen Realitäten mit passiver Bewegung (Coluccia & Louse, 2004). Deswegen werden im Folgenden beispielhaft insbesondere Studien zu Geschlechtsunterschieden in interaktiven (virtuellen) Umgebungen berichtet. Dies zeigt aber auch, wie wichtig die Art der Operationalisierung

ist und wie problematisch es ist, dass Orientierung oder Navigation in vielen Studien sehr unterschiedlich operationalisiert werden (vgl. Abschnitt 1.2).

Moffat, Hampson und Hatzipantelis (1998) ließen ihre Pbn durch ein recht einfaches monochrom dargebotenes virtuelles Labyrinth mit acht oder neun Sackgassen laufen und anschließend musste der Weg reproduziert werden. Dabei lösten Männer diese Aufgabe signifikant schneller als Frauen. Fehler wurden nicht erhoben.

Sakthivel, Patterson und Cruz-Neira (1999) ließen ihre Pbn über einen virtuellen Universitätscampus laufen und fanden auch da Geschlechtsunterschiede zugunsten der Männer. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Übertragung auf realistischere Kontexte als etwa die Morris-Wasserlabyrinthaufgabe ebenso zu Geschlechtsunterschieden führt. Ähnliches lässt sich über die Operationalisierung von Lövdén et al. (2007) sagen, die ihre Pbn durch ein virtuelles Museum navigieren ließen und ebenfalls bessere Leistungen bei Männern fanden. Allerdings wurde hier nicht durch eigene Erfahrung gelernt, sondern durch die vorherige Darbietung eines Planes aus der Vogelperspektive.

Die Studie von Driscoll et al. (2005) im virtuellen Morris-Wasserlabyrinth deutet darauf hin, dass sich der Männervorteil nicht generalisieren lässt: Im jungen Alter (20 – 39 Jahre) scheinen Männer den Frauen in dieser Aufgabe bezüglich der Pfadlänge überlegen zu sein, das heißt, sie legten kürzere Wege zurück als Frauen. Das ist aber die am häufigsten untersuchte Gruppe in psychologischen Experimenten. Im mittleren Alter (40 – 59) jedoch waren die Frauen den Männern überlegen, obwohl in beiden Geschlechtsgruppen insgesamt ein altersbedingtes Nachlassen in der Leistung zu beobachten ist (Driscoll et al., 2005). Diese Altersgruppe ist jedoch noch recht wenig untersucht, weswegen man darüber keine allgemeingültigen Aussagen treffen kann.

Interessanterweise betreffen die Vorteile der Männer vor allem Navigationsaufgaben, nicht aber das Objektlokalisationsgedächtnis. Hier übertreffen Frauen die Männer (z.B. Ratten: Saucier, Shultz, Keller, Cook, & Binsted, 2008; Menschen: z.B. Levy et al., 2005; beachte aber auch Saucier et al., 2002). Dies ist wieder ein Hinweis dafür, dass räumliches Gedächtnis und Navigation nicht das gleiche sind.

Insgesamt sind Männer also besser als Frauen in Aufgaben zur räumlichen Navigation, besonders in realistischen Umgebungen. Dies wird unter anderem darauf zurück geführt, dass Männer eher günstige Navigationsstrategien bevorzugen, während Frauen eher ungünstige, fehleranfälligeren Strategien verwenden. Dies wird im folgenden Abschnitt genauer dargestellt.

1.4.3 Geschlecht und Navigationsstrategien

Geschlechtsunterschiede in den Leistungen bei räumlichen Aufgaben allgemein werden unter anderem auf unterschiedliche Strategien zurück geführt (z.B. Jordan, Wüstenberg, Heinze, Peters, & Jäncke, 2002; Peters et al., 1995). Tatsächlich deuten nicht wenige Studien darauf hin, dass Männer und Frauen unterschiedliche Navigationsstrategien präferieren, beziehungsweise unterschiedliche räumliche Informationen nutzen.

Eine mögliche Art der Erfassung von Geschlechtsunterschieden bezüglich verschiedener Navigationsstrategien ist die anhand von Strategiefragebögen. Lawton und Kollegen fanden dabei wiederholt anhand ihrer *Wayfinding Strategy Scale*, dass Männer häufiger eine Orientierungsstrategie berichten und Frauen häufiger eine Routenstrategie (Lawton & Kallai, 2002; Lawton, 1994; Lawton, 1996; Lawton, Charleston, & Zieles, 1996).

Ein anderes Vorgehen wählten Saucier und Kollegen: Sie ließen ihre Pbn anhand verschiedener Arten von Wegbeschreibungen über einen Universitätscampus navigieren. Die Wegbeschreibungen beinhalteten entweder primär Landmarken- oder euklidische⁵, Richtungsinformation. Frauen konnten die Beschreibungen mit euklidischen Informationen nicht adäquat nutzen und machten in dieser Bedingung viel mehr Fehler als Männer (Saucier et al., 2002). Saucier et al. (2002) zogen daraus den Schluss, dass Männer generell eher euklidische Informationen während Navigation nutzen als Frauen. Männer weisen auf Nachfrage auch eher euklidisches Wissen auf, Frauen erinnern dagegen eher Landmarken (Galea & Kimura, 1993).

Eine weitere und der soeben geschilderten sehr ähnliche Erfassung präferierter räumlicher Information ist, die Pbn eine Wegbeschreibung zuvor gelernter Wege formulieren zu lassen, zum Beispiel so wie man einem Fremden einen Weg beschreiben würde. Es zeigt sich dabei meist, dass Männer dabei eher kardinale Richtungen (Norden, Süden, Westen, Osten) einbeziehen als Frauen, während diese eher Landmarken und Abbiegungen berichten (Harrel, Bowlby, & Hall-Hoffarth, 2000; MacFadden, Elias, & Saucier, 2003; Choi & Silverman, 1996; Dabbs et al., 1998; Ward, Newcombe, & Overton, 1986). Dazu passend sind Männer oft präziser bei Aufgaben, in denen auf nicht einsehbare Landmarken oder Orte gezeigt werden soll (Lawton, 1996; Montello, Lovelace, Golledge, & Self, 1999; Holding & Holding, 1989; Lawton & Morrin, 1999),

⁵ Euklidisch bedeutet eigentlich geometrisch, das heißt im weitesten Sinne räumlich und euklidischen Regeln folgend (s. Euklid: Die Elemente). Wenn in dieser Arbeit von euklidischer Information gesprochen wird, dann ist damit gemeint, dass Informationen nicht nur über Punkte vorliegen, sondern auch über Linien, Geraden, Strecken, Entfernungen und so weiter.

das heißt Männer verwenden eher vektorielle Informationen wie zum Beispiel den Heimkehrvektor (beachte aber z.B. Montello & Pick, 1993).

Insgesamt werden die Strategien in den meisten Studien zu Geschlechtsunterschieden somit vor allem mittels Fragebögen oder Wegbeschreibungen operationalisiert. In einer Studie zu Geschlechtsunterschieden in der Navigationsstrategiewahl von Levy und Kollegen wurden die Strategien dagegen verhaltensexperimentell differenziert. Die Autoren fanden die oben bereits beschriebenen Navigationsstrategien *Place* und *Response Strategy* in einem virtuellen T-Labyrinth und zwei von den Autoren als räumlich und nicht-räumlich bezeichnete Strategien im virtuellen Morris-Wasserlabyrinth (VMWM). Es konnten keine Unterschiede in der Präferenz für eine bestimmte Strategie zwischen den Geschlechtern gefunden werden, weder im T- noch im Wasserlabyrinth (Levy et al., 2005).

Demgegenüber fanden Sandstrom und Kollegen in ihrem Verhaltensexperiment im VMWM, dass Frauen anders als Männer nicht in der Lage waren euklidische Informationen sinnvoll zu nutzen. Sie wurden auch mehr als Männer davon beeinflusst, wenn zunächst vorhandene Landmarken im Testdurchgang plötzlich verschwanden oder falsch angeordnet waren (Sandstrom et al., 1998). Das deutet wiederum darauf hin, dass Männer und Frauen im VMWM unterschiedliche Strategien verwenden (können).

Einige Autoren berichten auch, dass Männer eher allozentrische, Frauen demgegenüber eher egozentrische Navigationsstrategien präferieren, wobei dies nicht verhaltensexperimentell untersucht wurde (z.B. Bever, 1992; Couclelis, 1996; Maguire et al., 1999).

In dem vorangegangenen Abschnitt wurden beispielhaft Befunde geschildert, die zeigen, dass Männer und Frauen sich in ihren räumlichen Leistungen, speziell bei Navigationsaufgaben, und in ihren Strategien beim Lösen solcher Aufgaben unterscheiden. Dabei zeigt sich, dass Männer Navigationsaufgaben meist besser oder schneller lösen als Frauen. Ferner nutzen Männer eher allozentrische, euklidische und Richtungsinformationen zur Orientierung, Frauen nutzen dagegen vor allem egozentrische, Landmarken- und Routeninformationen. Dabei wird in der Regel aber nicht näher spezifiziert, wie die Strategien inhaltlich konzeptualisiert sind. Ferner beruhen die Ergebnisse nahezu alle auf Selbstbeschreibungen und –beurteilungen. Diese sind aber durchaus anfällig für Stereotype und Erwartungen. Eines von zwei Verhaltensexperimenten findet keinen Unterschied in der Strategiepräferenz zwischen den Geschlechtern.

Aber auch wenn man davon ausgeht, dass Männer und Frauen sich in ihrer Navigationsstrategiepräferenz unterscheiden, heißt dies nicht unbedingt, dass dies der Grund für die Leistungsunterschiede ist. Dies wurde bisher noch nicht näher untersucht und miteinander in Zusammenhang gebracht. Insgesamt bleibt die Ursache für die Geschlechtsunterschiede noch im Dunkeln. Man kann aber wohl mit multiplen Einflüssen rechnen.

Im folgenden Abschnitt wird nun auf einen Einflussfaktor eingegangen, der sowohl für die unterschiedlichen Leistungen als auch für die unterschiedlichen Strategiepräferenzen eine modulierende Bedeutung zu haben scheint: die unterschiedliche Konzentration der Sexualhormone innerhalb der Geschlechter. Es sollte dabei allerdings nicht der Eindruck entstehen, diese seien der alleinige Grund für kognitive Geschlechtsunterschiede.

1.5 Sexualhormone und räumliche Navigation

Neben psychosozialen und evolutionären werden unter anderem auch hormonelle Einflüsse als Ursache kognitiver Geschlechtsunterschiede diskutiert (Halpern & Tan, 2001; Kimura, 1999), da zum Beispiel Sexualhormone (vor allem Östrogen, Progesteron und Testosteron) einen reliablen Einfluss auf kognitive Leistungen haben (z.B. Maki & Resnick, 2001; Halpern & Tan, 2001; McEwen, 2002a; Kimura, 2002; Sherwin, 2003a). Hinweise, dass unter anderem Sexualhormone für Geschlechtsdifferenzen verantwortlich sind, ergeben sich zum Beispiel aus Studien, nach denen sich kognitive Leistungsvariationen während des weiblichen Menstruationszyklus (siehe Abschnitt 1.5.1.2 und Abb.3) finden.

1.5.1 Sexualhormone

1.5.1.1 Hormone, Steroidhormone, Sexualhormone

Im menschlichen Körper gibt es prinzipiell zwei Kommunikationsarten: die nervöse und die endokrine. Während das Nervensystem schnell und gezielt arbeitet, wirkt das endokrine System gestreuter, langsamer, aber auch langanhaltender. Dessen Überträgerstoffe sind die Hormone, die entweder als Peptide, Steroide oder Tyrosin-Derivate (aus der Schilddrüse) vorkommen. Hormone stammen meist aus hormonproduzierenden Zellen und haben entweder eine untergeordnete Hormondrüse oder ein direktes Zielorgan. Sie entfalten ihre physiologische Wirkung über eine Hormon-Rezeptor-Interaktion an diesen Zielorganen. Die Rezeptoren für Steroid- und

Schilddrüsenhormone befinden sich im Zytoplasma oder im Zellkern (vgl. Thews & Vaupel, 1997; Czihak et al., 1996).

Zu den Steroidhormonen gehören unter anderem die Gonaden- oder auch Sexualhormone: Östrogene, Gestagene und Androgene. Sie haben alle gemeinsam, dass sie auf der Basis von Cholesterin gebildet sind.

Früher wurden diese Sexualhormone als geschlechtsspezifisch angesehen, das heißt Testosteron als wichtigster Vertreter der Androgene wirkt in männlichen Organismen, Östrogen und Progesteron, ein Gestagen, wirken in weiblichen Organismen. Diese Vorstellung rührt daher, dass sie stark an Fortpflanzungsfunktionen beteiligt sind. Tatsächlich sind jedoch alle Sexualhormone bei beiden Geschlechtern präsent, sie unterscheiden sich lediglich in ihrer relativen Konzentration. (vgl. Aloisi, 2007).

Östrogene sind C_{18} -Steroidhormone und als wichtigster Vertreter gilt das Östradiol, das auch über die größte biologische Wirksamkeit verfügt (vgl. Thews & Vaupel, 1997). Progesteron (auch: Gelbkörperhormon) ist ein C_{21} -Steroidhormon und der wichtigste Vertreter der Gestagene. Die Gruppe der Androgene sind C_{19} -Steroide, dazu zählen Testosteron, sowie sein wirksamer Metabolit 5α -Dihydrotestosteron (DHT).

Die Konzentrationen der einzelnen Sexualhormone unterliegen unterschiedlichen zirkadianen Schwankungen. Diese werden unter anderem durch die pulsatile Sekretion der Gonadotropine aus dem Hypophysenvorderlappen hervorgerufen. Die deutlichsten Veränderungen in den Sexualhormonkonzentrationen lassen sich bei Frauen beobachten: über ihren Menstruationszyklus, in der Schwangerschaft oder während ihrer Menopause. Da der Menstruationszyklus die regelmäßigste Form von hormoneller Schwankung darstellt und sich deshalb besonders gut für die Untersuchung der Wirkweise von Sexualhormonen eignet, wird dieser im folgenden Abschnitt erläutert.

1.5.1.2 Der weibliche Menstruationszyklus

Mit Erreichen der Geschlechtsreife unterliegen gesunde Frauen einem monatlich wiederkehrenden Reproduktionszyklus, der sie einmal im Monat für einige Tage empfängnisbereit macht. Dieser Zyklus wird beim Menschen und anderen Primaten⁶ als Menstruationszyklus⁷ bezeichnet. Der Ablauf des Menstruationszyklus wird durch eine Interaktion von Hypothalamus, Hypophyse, den Ovarien und dem Uterus bestimmt.

⁶ Bei anderen Säugetieren nennt man den Reproduktionszyklus dagegen in der Regel Brunft

⁷ von Mensis, lateinisch für Monat

Der Menstruationszyklus (vgl. Abb.3) einer gesunden Frau lässt sich in drei Phasen unterteilen: die Follikelphase, die Ovulation (Eisprung) und die Lutealphase. Die Menstruation, das heißt das Abstoßen der Gebärmutter Schleimhaut (Endometrium), wird meist nicht als eigene Phase gesehen, sondern als Teil der Follikelphase. Man spricht auch von früher Follikelphase (~Tag 1 bis 7). Die Menstruation stellt streng genommen das Ende des Zyklus dar, da dann das nicht verwendete Ei mit dem Endometrium abgestoßen wird. Dennoch wird der erste Tag der Menstruation als der erste Tag des Zyklus bezeichnet, wohl deshalb, weil sich dieser Tag offensichtlich leicht bestimmen lässt.

Ein normaler Zyklus dauert zwischen 25 und 35 Tagen, im Durchschnitt etwa 28 Tage. Nach der Abstoßung des Endometriums (Menstruationsblutung) beginnt die späte Follikelphase (~Tag 8-13). In dieser reifen Eibläschen heran, die Follikel. Diese bilden mit zunehmendem Reifegrad vermehrt Östradiol aus, so dass kurz vor der Zyklusmitte um den 14. Tag schließlich ein Östradiolmaximum erreicht wird. Es wird nun über verschiedene Rückkopplungsmechanismen die Ovulation ausgelöst, das heißt der Follikel platzt auf und stößt die Eizelle aus. Der Östradiolspiegel sinkt dabei kurzzeitig ab.

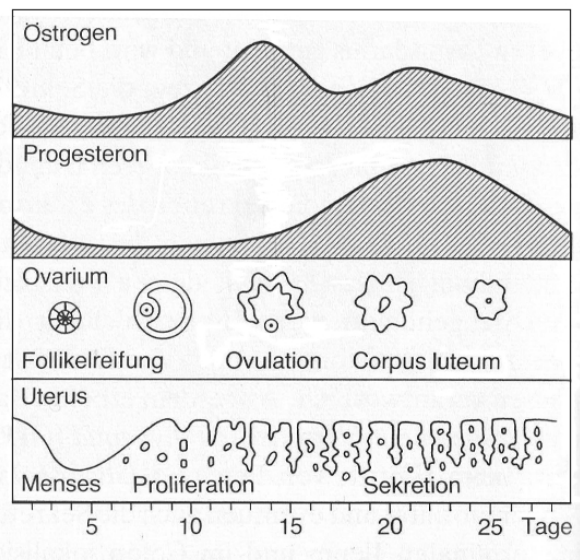


Abb.3: Schematische Darstellung der Hormonschwankung von Östrogen und Progesteron über einen durchschnittlichen weiblichen Menstruationszyklus, mit Darstellung der Follikelreifung und -veränderung, sowie der Veränderungen am Endometrium (Abb. nach Czihak et al., 1996, S. 682)

Der Follikel wird nun zum Gelbkörper (Corpus luteum), der Progesteron und Östrogen produziert, so dass deren Konzentration zunimmt. Damit beginnt die Gelbkörper- oder Lutealphase (~Tag 16-28). Durch die langsame Degeneration des Gelbkörpers sinkt der Progesteronspiegel ab und es kommt zu der Bildung von Prostaglandinen, die zu einer Schädigung des Endometriums führen. Die geschädigte Schleimhaut wird mit dem Menstruationsblut abgestoßen und ein neuer Zyklus kann beginnen (vgl. Abb.3 und Czihak et al., 1996; Thews & Vaupel, 1997).

1.5.1.3 Wirkung von Sexualhormonen

Steroidhormone und somit auch die Sexualhormone haben primär ein so genanntes genomisches Wirkprinzip, das heißt nachdem sich ein Hormon-Rezeptor-Komplex im Zellinneren gebildet hat, bindet dieser an die DNA. Die DNA wird daraufhin im Zellkern lokal entspiralisiert, so dass mRNA (messenger-Ribonukleinsäure) gebildet werden kann. Diese wandert zu den Ribosomen, wo dann in der Regel die Biosynthese eines Enzyms beginnt (vgl. Czihak et al., 1996; Kawata, 1995). Zusätzlich dazu können Steroidhormone aber auch, anders als lange vermutet, eine nicht-genomische Wirkung entfalten. Anders lässt sich die oft sehr schnell eintretende Wirkung nicht erklären. Zu solchen Wirkungen gehören zum Beispiel die Öffnung von Ionenkanälen (vgl. z.B. Joe, Kipp, & Ramirez, 2005), Effekte auf die Synaptogenese, auf exzitatorische NMDA⁸-Rezeptoren und sogar auch direkt auf Neurotransmitter (vgl. z.B. McEwen, 2002b).

Im Folgenden soll für jedes Sexualhormon einzeln kurz erläutert werden, welchem Wirkmechanismus dieses vor allem im zentralen Nervensystem (ZNS) folgt. Auf die Wirkungen auf Reproduktion und andere periphere Prozesse soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da sie nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Östrogen

Die zentralnervöse Wirkung der Östrogene ist die von allen Sexualhormonen am besten erforschte. Östradiol hat vielfältige Effekte auf Hirnfunktionen auch außerhalb rein reproduktiver Funktionen (vgl. z.B. McEwen, 2002b).

Östrogene haben neben perinatalen, organisierenden Effekten auch aktivierende Effekte innerhalb des ZNS. Aktivierend bedeutet in diesem Zusammenhang, die Hormone aktivieren bestimmte Funktionen im Rahmen der in der frühen Entwicklung angelegten neuronalen Organisation und haben somit aktuell wirksame und veränderbare Effekte. Östrogenrezeptoren wurden in vielen Hirnregionen nachgewiesen wie dem Hippocampus, dem zerebralen Cortex, dem Mittelhirn und dem Hirnstamm (vgl. McEwen & Alves, 1999).

Die Vielfältigkeit der Östrogenwirkungen zeigt sich darin, dass Östrogene neurotrope, neuroprotektive und psychotrope Effekte haben (vgl. Vedder, 2007).

Neurotrope Wirkungen sind solche, die direkten Einfluss auf zum Beispiel die Zellteilung von Neuronen oder auch die Ausbildung synaptischer Verbindungen nehmen. Naftolin und Kollegen konnten Ende der 1980er Jahre am Rattengehirn zeigen, dass sich der Einfluss von Östrogen auf verschiedensten Ebenen zeigen lässt: Östrogen

⁸ N-Methyl-D-Aspartat

führt zu Synapsenneubildung, zu Veränderungen an der post-synaptischen Membran, zu Veränderungen an innerzellulären Membranen und es fördert sogar die Exozytose, das heißt den Transport von zum Beispiel Enzymen aus der Zelle in den extrazellulären Raum (Naftolin, MacLusky, Leranth, Sakamoto, & Garcia-Segura, 1988).

Das wohl am besten untersuchte Areal neuromodulatorischer Wirkungen des Östrogens ist der Hippocampus. Hier hat Östrogen direkten Einfluss auf die Menge der synaptischen Spines (vgl. z.B. McEwen, 2002b; Korol, 2004). Es ist bereits oft nachgewiesen worden, dass Östrogen die Exzitabilität, sowie die synaptische Plastizität im Hippocampus erhöht (z.B. Korol et al., 1994; Woolley, Weiland, McEwen, & Schwartzkroin, 1997; Pozzo-Miller, Inoue, & Murphy, 1999) und zwar möglicherweise über eine Regulation der NMDA-Rezeptorbindung (z.B. Woolley et al., 1997; Daniel & Dohanich, 2001; für einen Überblick vgl. McEwen, 2002b). Östrogen reguliert vermutlich die cholinerge Funktion, das heißt die Funktion von Acetylcholin (ACh) hoch und gleichzeitig die Funktion des inhibitorischen Neurotransmitters Gamma-Aminobuttersäure (GABA) im Hippocampus herab (z.B. Daniel & Dohanich, 2001; Rudick & Woolley, 2001). Dies führt zu einer verminderten Inhibition durch GABA. Dadurch folgt eine Zunahme der NMDA-Rezeptorempfindlichkeit und -bindung, der Faserempfindlichkeit und der exzitatorischen synaptischen Verbindungen (vgl. dazu auch die Reviews von Korol, 2004 und McEwen, 2002b).

Auch im Striatum als Teil der Basalganglien hat Östrogen einen Einfluss auf dessen Funktion. Dort moduliert Östrogen die Funktionalität nicht über das GABAerge, sondern das dopaminerge System wie zumindest in tierexperimentellen Studien gezeigt werden konnte (vgl. Dluzen & Horstink, 2003). Bei weiblichen Ratten ließen sich zyklische Schwankungen der Dopaminausschüttung nachweisen: während des Proestrus ist der Dopaminspiegel besonders hoch und am niedrigsten im Diestrus, sowie nach Ovariectomie (Xiao & Becker, 1994). Allerdings ist der genaue Mechanismus der Modulation durch Östrogen bisher unklar. In Vorder- und Mittelhirn moduliert Östrogen wohl direkt das Serotoninsystem (vgl. McEwen, 2002b).

Die neuroprotektiven Wirkungen von Östrogen zeigen sich ebenfalls in vielfältiger Bandbreite. So wirkt es etwa entzündungshemmend und antioxidativ. Vermutlich hat es einen positiven Einfluss auf Entstehung und den Verlauf von Schizophrenie (vgl. Vedder, 2007; Häfner, 2007), sowie auf das Auftreten von Schlaganfällen und die Regeneration nach Hirntraumata (vgl. Vedder, 2007). Auch bei Morbus Alzheimer und Demenz hat es einen positiven Einfluss (vgl. Vedder, 2007; Kunz & Lautenbacher, 2007).

Progesteron

Progesteronrezeptoren finden sich im ZNS vor allem in Hypophyse, Hypothalamus und im präoptischen Areal (Graham & Clarke, 1997).

Progesteron hat eine GABA-erge, das heißt inhibitorische Wirkung auf das ZNS, da es unter anderem als GABA-Agonist wirkt und somit in der Lage ist, vergleichbar mit Barbituraten und Benzodiazepinen, die GABA-Rezeptoren zu binden und sie agonistisch zu beeinflussen, das heißt gewissermaßen vorzutäuschen, selbst GABA zu sein und damit ebenso zu wirken (vgl. Pluchino et al., 2006). Gleichzeitig reduziert Progesteron wohl die Aufnahme und Umsetzung des aktivierenden Neurotransmitters Glutamat (vgl. Hausmann & Güntürkün, 2000).

Hausmann und Güntürkün (2000) vermuten, dass Progesteron über die Umsetzung von Glutamat auch die zerebralen Asymmetrien vor allem durch die Veränderung des Informationsaustausches zwischen den beiden Hirnhälften über das Corpus callosum (Balken) verändert (Hausmann & Güntürkün, 2000). Das Corpus callosum besteht aus über 200 Millionen Fasern und verbindet beide Hirnhälften miteinander. Die Nervenzellen, die das Corpus callosum bilden, verwenden fast ausschließlich Glutamat. Während der Lutealphase könnte das Progesteron somit die Wirksamkeit dieser Verbindung verändern und die zerebralen Asymmetrien verringern.

Progesteron führt in den ersten Stunden seiner Zunahme zu einer potenzierten Zunahme der dendritischen Spines. Nach fünf Stunden allerdings kommt es zu einer schnelleren Abnahme der Spines in der so genannten CA1-Region des Hippocampus als dies nur bei einer Gabe von Östradiol zu beobachten ist (McEwen et al., 2001).

Eventuell spielt lokal synthetisiertes Progesteron im ZNS zudem eine wichtige Rolle bei der Myelinisierung der Axone von Nervenzellen (Baulieu, Schumacher, Koenig, Jung-Testas, & Akwa, 1996).

Testosteron

Ein Großteil der Wirkungen von Testosteron geht paradoxerweise auf die vorherige Aromatisierung zu Östradiol und die darauf folgende Aktivierung von Östrogenrezeptoren zurück (Kawata, 1995). Es gibt aber auch spezielle Testosteronrezeptoren. Im ZNS finden sich die meisten Neuronen mit spezifischen Rezeptoren für Testosteron im präoptischen Areal des Hypothalamus, sowie im limbischen System und im Cortex (Sherwin, 2003b).

Testosteron hat einen großen Einfluss auf die Maskulinisierung des Gehirns (vgl. z.B. Matsumoto, 2000; Arnold, 2007), wenngleich dies nur indirekt über die

Aromatisierung in das scheinbar weibliche Hormon Östradiol geschieht (so genannte „Aromatisierungs-Hypothese“).

Die Testosteron-Konzentration bei Männern korreliert etwa mit der Morphologie des posterioren Teils des Corpus callosums (Moffat, Hampson, Wickett, Vernon, & Lee, 1997). Daraus schließen die Autoren, dass Testosteron während der frühen Entwicklung große Bedeutung für den Aufbau der Architektur des Corpus callosums, aber auch des Cortex allgemein hat.

Testosteron hat aber auch aktivierende Wirkungen. Wie genau Testosteron im Gehirn wirkt ist zum jetzigen Zeitpunkt noch relativ unklar. Es wird aber vermutet, dass verhaltensmodulierende Effekte von Testosteron über den intrazellulären Botenstoff Norepinephrin und adrenerge Rezeptoren im Gehirn vermittelt werden. Testosteron fördert zum Beispiel die Expression von mRNA im Cortex von männlichen Tieren (Godwin, Hartmann, Nag, & Crews, 2000; Zhao et al., 2008).

Testosteron wirkt damit im ZNS eventuell auf die neuronale Erregbarkeit (vgl. Aloisi, 2007): Eine Erhöhung des Steroidhormonspiegels bei Männern führt zu einer Herabsetzung der motorischen Schwelle bei transkranieller Magnetstimulation (TMS) (Bonifazi, Ginanneschi, della Volpe, & Rossi, 2004). Dieser Schwellwert kann als Marker für die neuronale Exzitabilität angesehen werden. Darüber hinaus scheint Testosteron auch neuroprotektive Wirkungen zu haben (Hammond et al., 2001).

Die Tatsache, dass Sexualhormone vielfältige Wirkungen im ZNS entfalten, deutet darauf hin, dass sie einen direkten oder indirekten Einfluss auf kognitive Prozesse haben. Über welchen neuronalen Mechanismus Sexualhormone kognitive Leistungen genau beeinflussen, ist zwar weitestgehend unbekannt, aber dass sie wirken, zeigt sich auch in verhaltensexperimentellen Studien bezüglich kognitiver Leistungen in Abhängigkeit vom Hormonstatus wie im folgenden Abschnitt gezeigt werden wird.

1.5.2 Sexualhormone und räumliche Navigationsleistung

1.5.2.1 Sexualhormone und kognitive Leistungen

Es ist bereits in vielen Studien gezeigt worden, dass Sexualhormone und kognitive Leistungen nicht unabhängig voneinander sind (z.B. Hausmann, Slabberkorn, Van Goozen, Cohen-Kettenis, & Güntürkün, 2000; Sherwin, 2003a, 2003b; Hausmann, 2007).

Bei Frauen gehen niedrige zyklusbedingte Östradiol- und Progesteronspiegel zum Beispiel während der Menstruation mit guten Leistungen in räumlichen Aufgaben einher,

während hohe Hormonspiegel bessere Leistungen in verbalen Aufgaben begleiten (z.B. Hausmann et al., 2000; Rosenberg & Park, 2002; Moody, 1997; Silverman & Phillips, 1993). Zusätzlich dazu finden sich zum Beispiel auch positive Korrelationen zwischen räumlichen Leistungen und dem Testosteronspiegel (Driscoll et al., 2005; Hooven, Chabris, Ellison, & Kosslyn, 2004; Aleman, Bronk, Kessels, Koppeschaar, & van Honk, 2004).

Neben reinen Verhaltensänderungen ließen sich auch im Elektroenzephalogramm (EEG) Veränderungen über den Menstruationszyklus zeigen: Während der Ovulation zeigten Frauen ein so genanntes höher dimensioniertes EEG, das als Zeichen erhöhter Kreativität gilt, vor allem in zentralen und parietalen Regionen, als während Follikel- und Lutealphase. Dabei bedeutet dimensionale Komplexität eine stärkere Interaktion kompetitiver Neuronen (Krug, Mölle, Fehm, & Born, 1999).

Für Testosteron lässt sich ebenfalls ein Einfluss auf kognitive Leistungen nachweisen. So finden sich etwa positive Korrelationen zwischen räumlichen Leistungen und dem Testosteronspiegel (z.B. Hooven et al., 2004; Driscoll et al., 2005), sowie negative zwischen Testosteronspiegel und Wortflüssigkeit bei Männern (Wolf & Kirschbaum, 2002). Silverman und Phillips (1993) finden, dass ein erhöhter Testosteronspiegel nur bei Frauen eine Verbesserung visuell-räumlicher Leistungen und eine Verschlechterung der verbalen begleitet.

Einige Studien finden auch einen umgekehrt u-förmigen Zusammenhang zwischen Testosteronkonzentration und Leistung (z.B. Moffat & Hampson, 1996; Muller, Aleman, Grobbee, de Haan, & van der Schouw, 2005). Die beste Leistung in räumlichen Tests erreicht man somit möglicherweise nicht mit möglichst viel Testosteron, sondern mit einer optimalen Menge.

Neben Korrelationsstudien bieten sich auch Studien an, bei denen Testosteron künstlich substituiert wird. Dies ist oftmals der Fall, wenn sich etwa transsexuelle Frauen zum Mann umwandeln lassen wollen. Dabei zeigt sich teilweise erneut, dass Testosteron räumliche Fähigkeiten (in der Regel Mentale Rotation) und das visuelle Arbeitsgedächtnis verbessert (z.B. Slabbekoorn, van Goozen, Megens, Gooren, & Cohen-Kettenis, 1999).

1.5.2.2 Sexualhormone und räumliche Navigation

Nachdem erläutert wurde, dass Sexualhormone Einfluss auf kognitive und dabei vor allem räumliche Leistungen allgemein haben, wird im folgenden Abschnitt erläutert, welchen Einfluss diese konkret auf Leistungen in Aufgaben zur räumlichen Navigation haben.

In tierexperimentellen Studien zeigte sich bei Testosterondeprivation (zum Beispiel durch Gonadoektomie) eine Verschlechterung der Leistung in Labyrinthaufgaben und eine erneute Verbesserung bei anschließender künstlicher Zugabe von Testosteron (z.B. Kritzer, McLaughlin, Smirlis, & Robinson, 2001). Beim Menschen ist ebenfalls eine Verbesserung der Leistung im virtuellen Morris-Wasserlabyrinth (VMWM, vgl. Abschnitt 1.2) mit zunehmender Testosteronkonzentration zu beobachten (Burkitt, Widman, & Saucier, 2007; Driscoll et al., 2005).

Tierexperimentelle Studien deuten darauf hin, dass Nager schlechtere Leistungen im Morris-Wasserlabyrinth (MWM) erbringen, wenn ihr Östradiolspiegel hoch ist (Galea, Kavaliers, Ossenkopp, & Hampson, 1995; Snihur, Hampson, & Cain, 2008; Rissanen, Puoliväli, van Groen, & Riekkinen, 1999). Progesteron oder zumindest sein Metabolit Allopregnanolon vermindert bei Nagern ebenfalls die Leistung im MWM (Johansson, Birzniece, Lindblad, Olsson, & Backstrom, 2002). Für Menschen zeigt sich, dass Frauen dann schlechtere Leistungen in einer virtuellen Realität (VR) erbringen, das heißt mehr Fehler machen, wenn sie sich in ihrer Lutealphase (Progesteron und Östrogen hoch, vgl. Abb.3) befinden und ihnen keine Landmarkeninformationen zur Verfügung stehen, während sie zu Zeiten ihrer Menstruation (Östrogen und Progesteron niedrig) nicht beeinflusst sind und die gleichen Leistungen erbringen wie Männer (Chabanne, Péruch, & Thinus-Blanc, 2005).

Daraus kann man den Schluss ziehen, dass räumliche Navigation durch Östrogen und Progesteron eher verschlechtert und durch Testosteron eher befördert wird. Andererseits ist bekannt, dass Östrogen und Progesteron räumliche Gedächtnisleistungen positiv beeinflussen befördern (z.B. Frye, Duffy, & Walf, 2007). Dieser scheinbare Widerspruch kann gelöst werden, indem man Untersuchungen zum räumlichen Gedächtnis von denen zur räumlichen Navigation und Orientierung getrennt betrachtet (vgl. auch Abschnitt 1.2).

1.5.3 Sexualhormone und Navigationsstrategien

In tierexperimentellen Studien konnte gezeigt werden, dass weibliche Ratten eher eine *Place Strategy* wählen, wenn ihre weiblichen Hormone, vor allem Östrogen hoch sind (Korol et al., 2004; Quinlan, Hussain, & Brake, 2008).

Korol et al. (2004) etwa setzten ihre Versuchstiere in ein so genanntes Plus-Labyrinth (vgl. Abb.4), das von externen Hinweisreizen umgeben war und ließen sie lernen, in welchem Arm sich eine Futterpille befand. Wenn die Tiere dies gelernt hatten, wurden sie im Testdurchgang zu Beginn in einen anderen Arm des Labyrinths gesetzt als in den Lerndurchgängen (vgl. Abb.4).

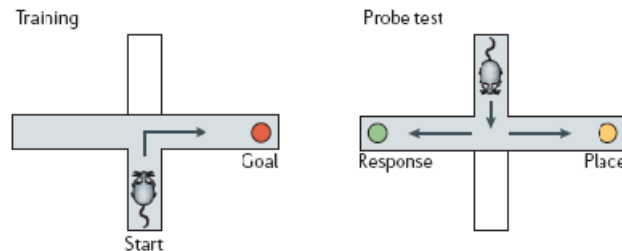


Abb. 4: Versuchsaufbau der Studien von Korol et al. (2004): In den Lerndurchgängen lernen die Tiere, dass in einem bestimmten Arm des Labyrinths Futter liegt. Im Testdurchgang werden sie umgesetzt. Einige Tiere verfolgen eine Response Strategy und laufen wie gewohnt nach rechts. Andere haben sich stattdessen den Ort des Futters (Place) gemerkt und laufen deshalb nach links. (Abbildung aus Cahill, 2006).

Einige Tiere liefen nun wieder in den Arm, den sie gelernt hatten und der durch die externen Hinweisreize markiert wurde: Korol spricht von einer allozentrischen Ortsstrategie (*Place Strategy*). Andere hatten sich offenbar nicht den Ort des Futters gemerkt, sondern dass sie zum Beispiel einmal rechts abbiegen mussten (vgl. Abb. 4). Diese Tiere verfolgten eine Strategie, die Korol eine egozentrische Antwortstrategie (*Response Strategy*) nennt. Weibliche Tiere während des Proöstrus, wenn die weiblichen Sexualhormone eine relativ hohe Konzentration im Blut aufweisen, wählten signifikant seltener eine solche *Response Strategy* als Tiere während des Diöstrus (Korol et al., 2004). Das bedeutet, Östrogen fördert offenbar die Wahl einer *Place Strategy* oder behindert eine *Response Strategy*.

Für Menschen wurde ein Einfluss von Sexualhormonen auf die Strategiepräferenz bisher nur wenig untersucht. Choi und Silverman (2002) berichten aber, dass die Testosteronkonzentration bei Männern positiv mit dem Nutzen als männlich betrachteter Routenvariablen in verbalen Beschreibungen korreliert und negativ mit dem Nutzen von Landmarken und relativer (im Gegensatz zu kardinalen) Richtungen jeweils bei Männern, nicht aber bei Frauen (Choi & Silverman, 2002).

Obwohl Chabanne et al. (2005) nicht direkt eine Strategiepräferenz aufgrund von Sexualhormonen untersucht haben, ergeben sich aus ihrer Studie dennoch gewisse Implikationen diesbezüglich: Sie konnten zeigen, dass die Navigationsleistungen von

Frauen in ihrer Lutealphase nur dann im Vergleich zur Menstruation vermindert sind, wenn Landmarkeninformationen nicht vorhanden sind und sie sich allein auf geometrische Informationen stützen können. Dies ist konsistent mit den tierexperimentellen Studien, nach denen sich Tiere mit hohen Spiegeln an weiblichen Sexualhormonen lieber an externen Landmarken orientieren, das heißt eine *Place Strategy* präferieren.

Insgesamt kann also gezeigt werden, dass weibliche Tiere und Frauen zu Zeiten hoher Östrogen- und Progesteronspiegel innerhalb ihres Zyklus eher dazu neigen externe Landmarken zur Orientierung zu nutzen, beziehungsweise dies bevorzugen. Für Männer lässt sich dagegen zeigen, dass diese eher kardinale Richtungsinformationen präferieren, wenn ihr Testosteronspiegel hoch ist.

1.6 Neuronales Korrelat der räumlichen Navigation

1.6.1 Allgemein

Allgemein gültige Aussagen bezüglich der neuronalen Netze, die während räumlicher Navigation aktiviert werden, sind deswegen schwer zu treffen, da die verwendeten Aufgaben und Anforderungen in den durchgeführten Bildgebungsexperimenten hochgradig differieren (vgl. Abschnitt 1.2). Dies führt zu den zum Teil sehr divergenten Aussagen bezüglich der in Navigationsprozesse involvierten Hirnregionen. Es sind dennoch einige verhältnismäßig konsistente Areale identifizierbar, die in vielen, aber auch nicht in allen Studien zu Navigationsaufgaben gefunden werden. Als sicher kann die Beteiligung des rechten Parietallappens (vgl. z.B. Burgess, Jeffery, & O'Keefe, 1999b; Hartley et al., 2003b) gelten, ebenso des posterioren Cingulums (vgl. z.B. Maguire et al., 1999; Grön et al., 2000; Ohnishi, Matsuda, Hirakata, & Ugawa, 2006), des präfrontalen Cortex (Burgess, Jeffery, & O'Keefe, 1999a; Maguire et al., 1998), Teile der Basalganglien, vor allem des Nucleus caudatus und des Striatums (vgl. z.B. Hartley et al., 2003b; McNamara, Shelton, & Shelton, 2003) und des medialen Temporallappens einschließlich des Hippocampus und des Parahippocampus (vgl. z.B. Maguire et al., 1999; Burgess et al., 1999b; Ohnishi et al., 2006), sowie des entorhinalen Cortex (Witter & Moser, 2006). Teilweise werden auch frontale Strukturen (z.B. Mellet et al., 2000), sowie Cuneus und Präcuneus (z.B. Ohnishi et al., 2006) berichtet.

Dass der Hippocampus (vgl. Abb.5) in das räumliche und topographische Gedächtnis involviert ist, ist unbestritten (vgl. z.B. O'Keefe & Nadel, 1978; Burgess et al., 2002; Spiers et al., 2001; Maguire, Nannery, & Spiers, 2006; Bird & Burgess, 2008). Erstmals wurde dies durch die Entdeckung der so genannten Ortszellen (*Place cells*)

deutlich: Diese Neurone feuern immer dann im Hippocampus von Ratten, wenn diese sich an ganz spezifischen Orten einer gelernten Umgebung befinden. Das heißt Ortszellen sind lokalisationsselektiv und -spezifisch (O'Keefe & Dostrovsky, 1971). Aus dieser Entdeckung heraus entstand die Theorie der kognitiven Karte des Hippocampus (O'Keefe & Nadel, 1978), nach der dieser der Ort der kognitiven Karte (s. Abschnitt 1.3.2) im Gehirn ist. Nach dieser Theorie ist der Hippocampus bei Nagern an der Bildung einer Repräsentation von Umgebungen, Orten innerhalb dieser Umgebungen und deren Inhalte beteiligt und damit die Basis für eine flexible Orientierung und Navigation. Beim Menschen findet sich im Gegensatz zu den Tieren eine Lateralisierung: Die Verschlüsselung räumlicher Informationen findet vor allem im rechten Hippocampus ihren Niederschlag, während der linke Hippocampus eher für die Speicherung episodischer Gedächtnisinhalte zuständig ist. Beiden Hippocampi gemeinsam wäre demnach ein räumlich-zeitliches Kontextgedächtnis (vgl. z.B. Burgess et al., 2002). Zusätzlich zu den Ortszellen werden in neuerer Zeit auch Kopfrichtungszellen (*head direction cells*) (Taube, Muller, & Ranck, 1990) und Gitterzellen (*grid cells*) im entorhinalen Cortex (Hafting, Fyhn, Molden, Moser, & Moser, 2005; s.a. Abb.5) berichtet. Letztere werden diskutiert als die Basis der euklidischen Distanzen und metrischen Richtungen, die als Teil der kognitiven Karte innerhalb der Theorie der kognitiven Karte des Hippocampus angenommen werden (vgl. Bird & Burgess, 2008).

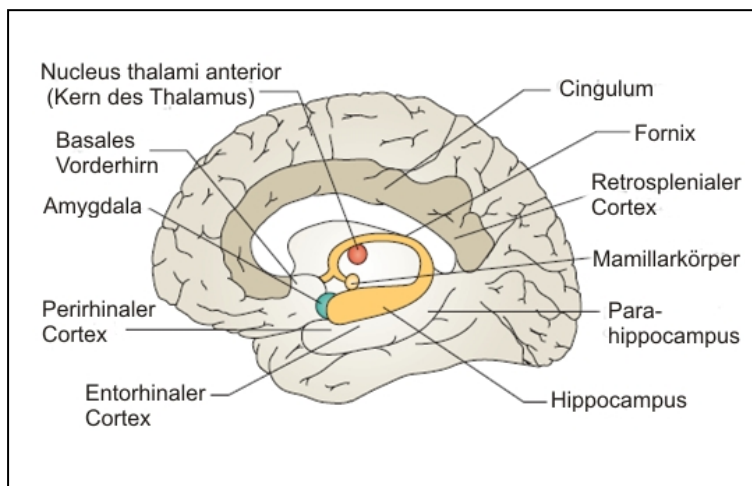


Abb. 5: Hippocampusformation. Der Hippocampus liegt im medialen Temporallappen und ist umgeben vom Parahippocampus, Entorhinalen und den perirhinalen Cortex. Der Hippocampus hat eine zentrale Funktion innerhalb des limbischen Systems inne und ist Teil des so genannten Papez'schen Kreises als Erklärungsmodell zur Entstehung von Emotionen. Somit hat er viele Verbindungen zu subkortikalen und kortikalen Strukturen (Abbildung aus Bird & Burgess, 2008)

Es sei erwähnt, dass der Hippocampus nicht spezifisch für die Speicherung topographischer, beziehungsweise räumlicher Informationen und die Erstellung der kognitiven Karte ist. Eichenbaum und Kollegen gehen von einem relationalem Konzept der Hippocampusfunktion aus: Sie meinen, dessen Hauptfunktion sei die assoziative Verknüpfung von Informationen. Der Hippocampus sei demnach an räumlichen Orientierungsaufgaben beteiligt, weil die dafür benötigte Information auf der

Anwendung gelernter Verknüpfungen (zum Beispiel Abbiegungen) beruht (Eichenbaum, Dudchenko, Wood, Shapiro, & Tanila, 1999).

Ferner sei an dieser Stelle erneut auf die oftmals vorgebrachte Vermischung räumlichen Gedächtnisses und räumlicher Navigation hingewiesen. Ob der Hippocampus eher für räumliches Gedächtnis oder tatsächlich für Orientierung und Navigation zuständig ist, ist meist nicht ganz klar aus den Studien herauszufiltern. Seine Aktivierung scheint aber deutlich von der Art der Aufgabe abzuhängen (vgl. z.B. Hartley, King, & Burgess, 2003a).

Zusätzlich zum Hippocampus wird vor allem der rechte (posteriore) Parietallappen immer wieder mit räumlicher Orientierung und Navigation in Verbindung gebracht (vgl. z.B. Burgess et al., 1999b; Berthoz, 1997; Hartley et al., 2003a; Colby & Goldberg, 1999). Dabei unterscheiden sich die Ansichten, welche parietalen Subareale nun wesentlich für räumliche Navigation sind: der Präcuneus (z.B. Ghaem et al., 1997; Mellet et al., 2000; Burgess, Maguire, Spiers, & O'Keefe, 2001), der inferiore (z.B. Maguire et al., 1999) oder der superiore Parietallappen (Grön et al., 2000; Shelton & Gabrieli, 2002).

Der Parietallappen erhält direkt sensorische Informationen von Haut, Muskeln, Gelenken und Innenohr (vgl. z.B. Colby & Goldberg, 1999), und scheint insbesondere für die Wahrnehmung und Steuerung der Körperposition verantwortlich zu sein (Lagesinn). Einige intraparietale Neurone sind zum Beispiel sensitiv für vestibulären sensorischen Input, vermutlich weil sie die Bewegung des Kopfes im Raum enkodieren (Bremmer, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 1997). Während der Hippocampus vor allem mit allozentrischem räumlichen Wissen in Verbindung gebracht wird, vermutet man darum, dass der Parietallappen für eine egozentrische Repräsentation verantwortlich ist (vgl. z.B. Burgess et al., 2002; Colby & Goldberg, 1999; Byrne, Becker, & Burgess, 2007; Wolbers et al., 2004). Dabei ist es wahrscheinlich, dass beide Systeme miteinander korrespondieren. Maguire et al. (1998) nehmen an, dass der rechte Hippocampus und der inferiore Parietallappen bei der Navigation vor allem zu einem nicht sichtbaren Ziel miteinander kooperieren: Der Hippocampus ermögliche eine allozentrische Repräsentation, die dem Individuum Auskunft darüber geben kann, wo sich innerhalb der Konfiguration Start und Ziel befinden. Der Parietallappen nutzt diese Information, um die relative Ausrichtung des Individuums und die nötigen Körperbewegungen (egozentrisch) zur Erreichung des Ziels zu errechnen. Ohnishi et al. (2006) berichten auch den Präcuneus im parietalen Cortex als wichtiges Areal der Navigation. Sie konnten zeigen, dass dieser stärker bei guten Navigierern als bei schlechten aktiviert ist.

Weiterhin wird oftmals der Parahippocampus als Beteiligter bei räumlicher Orientierung und Navigation berichtet (vgl. z.B. Aguirre, Zarahn, & D'Esposito, 1998; Mellet et al., 2000; Weniger & Irle, 2006), wobei er oft mit Landmarkenerinnern in Verbindung gebracht wird: Läsionen im Parahippocampus gehen nämlich mit Defiziten im Landmarkenabruf einher (z.B. Bohbot et al., 1998). Bildgebende Studien bestätigen dies: Der Parahippocampus wird beim Erinnern von Objektlokalisationen in statischen zweidimensionalen Anordnungen aktiviert, der Hippocampus jedoch nicht (Johnsrude, Owen, Crane, Milner, & Evans, 1999; Owen, Milner, Petrides, & Evans, 1996).

Ferner finden sich immer wieder Teile der Basalganglien als an der Navigation beteiligt, vor allem der Nucleus caudatus (z.B. Moffat, Kennedy, Rodrigue, & Raz, 2007; Hartley et al., 2003b; McNamara, 2003) und das Striatum (z.B. Hartley & Burgess, 2005). Dabei wird diesen eine weniger räumliche als sequentielle Rolle zugesprochen: sie seien vor allem für Routenlernen, das heißt für das Lernen einer bestimmten Sequenz und nicht zwingend für die Verarbeitung räumlicher Information zuständig (z.B. Hartley et al., 2003b; Iaria et al., 2003; Miranda, Blanco, Begega, Rubio, & Arias, 2006; Korol, 2004). Es zeigte sich, dass die Aktivierung des Nucleus caudatus mit der Geschwindigkeit des Durchlaufens der Umgebung korreliert ist (z.B. Maguire et al., 1998).

Der (linke) präfrontale Cortex wird im Zusammenhang mit räumlicher Navigation als dasjenige Areal interpretiert, das für die Planung praktikabler Routen aus dem im Gedächtnis gespeicherten Wissen über die Umgebung zuständig ist (vgl. z.B. Maguire et al., 1998; Hartley et al., 2003a; Maguire et al., 1999).

Insgesamt kann man also feststellen, dass zwar einige neuronale Strukturen als klar an Navigationsprozessen beteiligt gelten können, wie etwa parietale Strukturen und der Hippocampus. Es gibt aber auch einige Inkonsistenzen. Dies kann einmal mehr auch mit den unterschiedlichen Operationalisierungen räumlicher Navigation zusammenhängen, die in unterschiedlichen Studien gewählt werden. Es dürften zum Beispiel beim Morris-Wasserlabyrinth andere kognitive und damit neuronale Prozesse zugrundeliegen als in einem klassischen Labyrinth, in dem nicht die gesamte Umgebung einsehbar und die Bewegung durch Wände eingeschränkt ist.

1.6.2 Geschlechtsunterschiede

Geschlechtsunterschiede bezüglich räumlicher Navigation lassen sich nicht nur auf der Verhaltens- (vgl. Abschnitt 1.4), sondern auch auf neuronaler Ebene feststellen. Im Tierexperiment mit Ratten lässt sich etwa zeigen, dass Läsionen des frontalen Cortex zu

größeren Schwierigkeiten in Orientierungsaufgaben bei weiblichen Tieren führen (Kolb & Cioe, 1996), Läsionen im entorhinalen Cortex demgegenüber eher bei männlichen Tieren (Roof, Zhang, Glasier, & Stein, 1993).

Obwohl einige Studien menschliche Geschlechtsunterschiede auf neuronaler Ebene während räumlicher Aufgaben wie etwa Mentaler Rotation untersucht haben (z.B. Jordan et al., 2002; Thomsen et al., 2000; Hugdahl, Thomsen, & Ersland, 2006), gibt es bisher nur wenige Studien, die Unterschiede der neuronalen Aktivierung bei Männern und Frauen während räumlicher Navigation erforschen. In einer Studie von Grön und Kollegen mussten die Pbn durch ein relativ komplexes, ihnen unbekanntes Labyrinth navigieren, das heißt den Ausgang aus dem Labyrinth finden. Die Autoren fanden bei Männern eine signifikant stärkere Aktivierung als bei Frauen im linken Hippocampus, bei Frauen demgegenüber eine stärkere Aktivierung des rechten Parietallappens und rechts präfrontaler Strukturen (Grön et al., 2000). Die Autoren erklären diese Unterschiede mit einer unterschiedlichen Verarbeitung räumlicher Informationen und interpretieren dies wie folgt: Die stärkere präfrontale Aktivierung bei Frauen sei darauf zurückzuführen, dass Frauen eher Landmarkenwissen nutzen und dafür Arbeitsgedächtnisprozesse in die Orientierung einbeziehen müssen. Parietale Aktivierungen könnten zudem für eine eher egozentrische Repräsentation sprechen. Männer hingegen nutzten stärker geometrische Informationen. Deren stärkere Aktivierung des linken Hippocampus sei darauf zurückzuführen, dass die Männer dadurch in der Lage seien, multiple geometrische Reize zu verarbeiten. Eine andere Interpretation, die Grön und Kollegen vorschlagen ist die, dass Männer möglicherweise vermehrt episodische Informationen während der Navigation nutzen (Grön et al., 2000).

In einer weiteren Studie von Schadow, Jordan, Wüstenberg und Jäncke (2004) zeigten sich ebenfalls Geschlechtsunterschiede während räumlicher Navigation: Frauen zeigten im direkten Vergleich mit Männern stärkere Aktivierungen in frontalen Arealen, sowie in der SMA (*supplementary motor area*) und im Cerebellum. Männer zeigten dagegen mehr Aktivierungen im Präcuneus (vgl. Abb. 6). Einige Autoren fanden dagegen keine relevanten

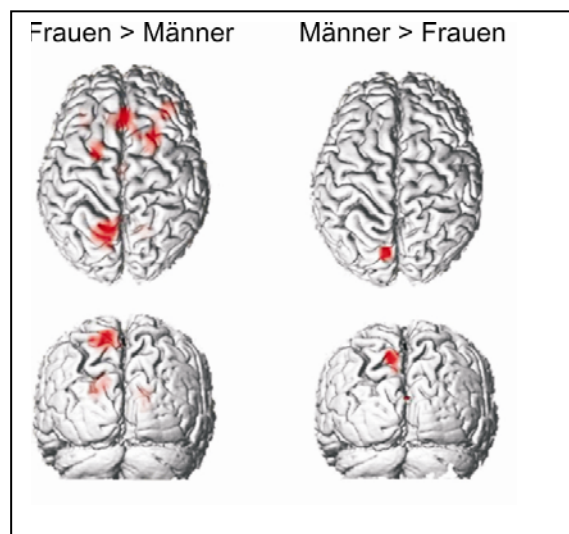


Abb. 6: Ergebnisse der Studie von Schadow et al. (2004). Neuronale Aktivierungsunterschiede der Geschlechter im direkten Vergleich

Geschlechtsunterschiede in der neuronalen Aktivierung während virtueller Navigation im virtuellen Wasserlabyrinth (Ohnishi et al., 2006; Moffat et al., 2007).

Es gibt also erst zwei bildgebende Studien zu neuronalen Aktivierungsunterschieden bei Männern und Frauen. Dies ist eine recht dürftige Datenlage, aufgrund der wohl kaum allgemeingültige Aussagen zu neuronalen Prozessen bei den Geschlechtern gemacht werden können. Hinzu kommt, dass viele Variablen die Aktivierung bedingen dürften, dazu gehört auch die Art des Labyrinths. Während Grön und Kollegen ein recht komplexes virtuelles Labyrinth verwendeten, nutzten Schadow et al. ein eher einfaches Labyrinth, das zum Beispiel kaum visuellen Fluss aufweist.

1.6.3 Strategieunterschiede

Es ist sehr wahrscheinlich, dass es Unterschiede in den neuronalen Aktivierungsmustern während räumlicher Navigation in Abhängigkeit von der präferierten Navigationsstrategie gibt. Wie bereits oben beschrieben, gehen viele Autoren davon aus, dass die unterschiedlichen neuronalen Aktivierungen bei Männern und Frauen auf die unterschiedliche Verarbeitung räumlicher Informationen und damit auf unterschiedliche Strategien beim Lösen von Navigationsaufgaben zurückzuführen sei.

Einheitliche Ergebnisse zu neuronalen Unterschieden in Abhängigkeit der verwendeten Navigationsstrategie gibt es diesbezüglich bisher kaum, da deren Operationalisierung einmal mehr in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich ist (vgl. Abschnitt 1.2).

Hartley et al. (2003b) unterschieden beispielsweise zwischen *wayfinding* und *route-following* durch unterschiedliche Aufgabenstellungen in zwei virtuellen Städten. Die Gruppe derjenigen, welche eine *wayfinding*-Aufgabe bewältigen mussten, durften in der Lernphase die Umgebung frei explorieren, was nach Ansicht der Autoren zu Überblickswissen führt. Die Gruppe derjenigen, die eine *route-following*-Aufgabe erhielten, lernten in der vorgehenden Lernphase immer wieder diese spezifische Route abzulaufen, was zu Routenwissen führt und nicht zu Überblickswissen. Dies stellte die Operationalisierung zweier Strategien, das heißt Überblicks- und Routenstrategie in dieser fMRI-Studie dar. Hartley et al. (2003b) fanden tatsächlich unterschiedliche Aktivierungen für beide Gruppen: In der *wayfinding*-Gruppe wurde vermehrt der rechte Hippocampus aktiviert, in der *route-following*-Gruppe dagegen vor allem der Nucleus caudatus. Dies ist konsistent mit der Annahme, dass für ein Überblickswissen, das heißt die kognitive Karte der Hippocampus von großer Bedeutung ist, für motorische, automatisierte Prozesse dagegen eher der Nucleus caudatus.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Iaria et al. (2003). Die Autoren unterscheiden ebenfalls zwei Navigationsstrategien: eine räumliche und eine nicht-räumliche. Beide sind inhaltlich mit einer *Place* und *Response Strategy* gleich zu setzen wie sie auch in anderen Studien berichtet werden: Die Pbn mussten in einem 8-Arm-Labyrinth, um das externe Landmarken standen, in vier Armen Objekte finden. Nach drei Lerndurchgängen wurden die Landmarken entfernt. Pbn, die sich an diesen orientiert hatten (*Place Strategy*, beziehungsweise hier: räumliche Strategie), machten nun vermehrt Fehler und konnten anhand dieser der räumlichen Strategie zugeordnet werden. In der fMRI-Studie wurden die Strategien dann aber anhand von Fragebögen ermittelt. Beide Strategiegruppen unterschieden sich im Wesentlichen ebenfalls in ihren neuronalen Aktivierungen in Hippocampus und Nucleus caudatus: In der Gruppe mit *Place Strategy* wurde vermehrte Hippocampusaktivierung gemessen, in der Gruppe mit *Response Strategy* dagegen zunehmende Aktivierung im Nucleus caudatus.

Shelton und Gabrieli (2002) untersuchten mittels fMRI unterschiedliche neuronale Aktivierungen in Abhängigkeit von der Repräsentationsart. Es wurde zwischen Routen- und Überblicksrepräsentation unterschieden. Operationalisiert wurde dies hier durch die Art der Präsentation. Die Pbn wurden zum Lernen einer virtuellen Umgebung entweder in einer Erste-Person-Perspektive durch eine virtuelle Umgebung gefahren, was eine Routenrepräsentation zur Folge haben sollte, oder sie sahen die Umgebung nur aus einer Überblicksperspektive, was zu einer Überblicksrepräsentation führen sollte. Die Autoren fanden im direkten Kontrast zwischen den beiden Repräsentationsformen unterschiedliche neuronal aktivierte Areale (Shelton & Gabrieli, 2002), allerdings nicht in Hippocampus und Nucleus caudatus.

Wie oben bereits erläutert, wird vielfach auch zwischen egozentrischen und allozentrischen Strategien während räumlicher Navigation unterschieden. Die Untersuchung unterschiedlicher neuronaler Aktivierungen aufgrund der verwendeten räumlichen Referenzsysteme ist verhältnismäßig häufig Gegenstand verschiedener Untersuchungen gewesen. Es wird oft angenommen, dass der Hippocampus eher für eine allozentrische Repräsentation räumlichen Wissens zuständig ist und parietale Areale die Grundlage für egozentrische Repräsentationen bilden. Einige Studien konvergieren in dem Ergebnis, dass der Parietallappen für eine körperbezogene Wahrnehmung und Navigation wesentlich zu sein scheint (vgl. z.B. Maguire et al., 1998; Blakemore & Frith, 2003). Obwohl viele empirische Befunde für eine solch distinkte funktionelle Trennung egozentrischer und allozentrischer Bezugssysteme sprechen, ist diese nicht ohne Zweifel geblieben. So gibt es auch Befunde, die zeigen, dass auch parietale Areale an einer

allozentrischen räumlichen Verarbeitung beteiligt sind (z.B. Save & Poucet, 2000). Ebenso wird argumentiert, dass eine enge anatomische Verknüpfung zwischen parietalen und hippocampalen Arealen bestünde, was eine enge funktionelle Verknüpfung, das heißt keine klare Trennung beider Netzwerke vermuten lässt (ebd.).

Es sind vor allem neuropsychologische Untersuchungen an Neglect-Patienten, die darauf hindeuten, dass unabhängige neuronale Schaltkreise für egozentrische und allozentrische Kodierung angenommen werden können: So kann zum Beispiel gezeigt werden, dass beide Referenzsysteme unabhängig voneinander und abhängig von der Art der Schädigung betroffen sein können (z.B. Ota et al., 2003; Hillis et al., 2005).

Zu der gleichen Ansicht bezüglich der neuronalen Unabhängigkeit der Systeme kommen auch Gramann, Müller, Schönebeck und Debus (2006). Diese konnten mittels EEG zeigen, dass während der Orientierung in einem visuell dargebotenen Tunnel, durch den die Pbn passiv gefahren wurden (vgl. Abschnitt 4.2.3.2), deutlich distinkte neuronale Areale in Abhängigkeit vom Referenzsystem aufzeigbar waren. In einem direkten Vergleich zwischen beiden Gruppen, das heißt Pbn mit egozentrischem und mit allozentrischem Referenzsystem, zeigten sich für Pbn mit einem egozentrischen stärkere Aktivierungen im superioren Gyrus occipitalis und im posterioren Parietallappen, für Pbn mit einem allozentrischen stärkere Aktivierungen im Cingulum. Die Autoren interpretieren dies so, dass die stärkere Aktivierung im superioren Gyrus occipitalis bei „Egozentrikern“ mit der verstärkten visuell-räumlichen Verarbeitung während der Tunnelfahrt zusammenhängen, da sie sich in einer Kurve eher mitdrehen. Die stärkere Aktivierung im Parietallappen hänge wiederum mit der stärkeren parietalen Bedeutsamkeit innerhalb einer egozentrischen Verarbeitung zusammen.

Zachle et al. (2007) konnten ebenfalls unterschiedliche neuronale Aktivierungen mittels fMRI in Abhängigkeit vom verwendeten Referenzsystem finden, wenngleich dies nicht während Navigation gemessen wurde, sondern die Lokation geometrischer Objekte betreffend. Im direkten Vergleich zwischen beiden Bedingungen (allozentrische versus egozentrische) war in der egozentrischen Bedingung eine stärkere Aktivierung im linken superioren Parietallappen, genauer im Präcuneus zu beobachten. In der allozentrischen Bedingung fanden die Autoren eine stärkere Aktivierung in beiden Hippocampi, entlang des ventralen Pfads („Was“-Pfad) und in rechts parietalen Arealen (Zachle et al., 2007). Die Aktivierung des Hippocampus bei der Nutzung eines allozentrischen Referenzsystem ist konsistent mit der Auffassung, dass dort auch während räumlicher Navigation allozentrische Informationen verarbeitet werden. Dass der Parietallappen für eine egozentrische Verarbeitung zuständig ist, ließ sich hier nur

bedingt zeigen, jedoch wurde besonders der Präcuneus auch schon in neuropsychologischen Untersuchungen als an egozentrischen Prozessen beteiligt gefunden, da seine Schädigung zum Beispiel zu egozentrischem Neglect führt (Hasselback & Butter, 1997).

Jordan et al. (2004) ließen ihre Pbn den Weg durch ein virtuelles Labyrinth lernen und befragten sie anschließend mittels Fragebogen, welche Strategie sie während des Navigierens verwendet hätten. Anhand dieser Befragung wurden die Pbn in zwei Gruppen unterteilt. Pbn, die eine allozentrische Strategie berichteten, wiesen im Vergleich mit Pbn mit einer egozentrischen Strategie stärkere Aktivierungen im Hippocampus, dem Parahippocampus und dem Thalamus auf. Dies ist konsistent mit der Annahme, dass im Hippocampus vor allem *allozentrische* Informationen repräsentiert werden.

Insgesamt kann man somit sagen, dass abhängig von den verwendeten Strategien oder den zugrunde liegenden Referenzsystemen in räumlichen Navigations- und Orientierungsaufgaben auch unterschiedliche neuronale Netzwerke und Areale beteiligt sind. Allerdings ist auch hier nicht immer ganz klar, wie die jeweilige Strategie genau spezifiziert ist und welche kognitiven Prozesse dieser zugrunde liegen sollen. Damit ist die Interpretation und Übertragbarkeit auf andere Bedingungen als die in den jeweiligen Studien verwendeten schwierig.

1.6.4 Einfluss von Sexualhormonen auf neuronale Aktivierungen

Sexualhormone haben, wie in Abschnitt 1.5.1.3 beschrieben, relevante zentralnervöse Effekte, die sich offenbar auch in der Performanz niederschlagen (vgl. Abschnitt 1.5.2). Dies müsste sich auf die neuronalen Aktivierungen auswirken, beziehungsweise müssten Areale, in denen sich Rezeptoren für Sexualhormone befinden, durch diese moduliert werden.

Tatsächlich zeigt sich in einigen Studien, dass Sexualhormone die neuronale Aktivierung modulieren können. In der Studie von Dietrich und Kollegen (2001) wurden Frauen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ihres Menstruationszyklus⁴ (vgl. Abschnitt 1.5.1.2) im Magnetresonanztomographen während verschiedener kognitiver Aufgaben untersucht, unter anderem Mentale Rotation. Dabei wurden deren neuronale Aktivierungsmuster mit denen von Männern verglichen. Es fanden sich zwischen den Geschlechtern keine Unterschiede in den neuronalen Aktivierungen, wenn die Frauen sich in der frühen Follikelphase befanden und Östrogen niedrig ist, wohl aber, wenn die

Frauen um den Eisprung herum gemessen wurden, wenn Östrogen hoch ist (Dietrich et al., 2001).

Schöning und Kollegen untersuchten diese Fragestellung genauer: Sie korrelierten das Ausmaß neuronaler Aktivierung bei Aufgaben zur mentalen Rotation mit den Serums-Hormonwerten (Schöning et al., 2007). Dabei fanden sie, dass bei Männern die Höhe des Testosterons mit neuronaler Aktivierung im linken Gyrus supramarginalis und inferioren Parietallappen korreliert war und bei Frauen in der frühen Follikelphase (Östrogen niedrig) im Nucleus caudatus. Die Konzentration des Östrogens war bei Männern nur im linken Parietallappen mit dem Ausmaß an neuronaler Aktivierung korreliert. Bei Frauen fanden sich dagegen viele Hirnareale, in denen die neuronale Aktivierung mit der Höhe des Östrogensoiegels zusammenhing, vor allem im Temporallappen, im linken Gyrus fusiformis, in parietalen Bereichen wie dem Präcuneus, im Frontallappen und im Gyrus postcentralis. Für Progesteron wurden nur wenige Korrelationen gefunden, eher in frontalen Cortexarealen (Schöning et al., 2007).

Andere Studien beschränkten sich eher auf bestimmte Hormone und deren Einfluss auf die neuronalen Aktivierungsmuster. Moffat und Resnick untersuchten zum Beispiel den Einfluss von Testosteron auf neuronale Aktivierungen, der sich mittels PET vor allem im Hippocampus, im Cerebellum und im Cingulum zeigen ließ, unabhängig von einer bestimmten Aufgabe (Baselinemessung) (Moffat & Resnick, 2007).

Einen Überblick über viele Studien, die den Einfluss von Östrogen auf neuronale Aktivierungen während ganz unterschiedlicher kognitiver Aufgaben untersuchen gibt der Review von Maki und Resnick (2001). Eine Untersuchung, die den Einfluss von Sexualhormonen auf die neuronalen Aktivierungen speziell während Navigation untersucht, ist meines Wissens noch nicht durchgeführt worden. Es ist aber anzunehmen, dass die Sexualhormone auch während dieser einen Einfluss auf die Aktivierungen haben, da sich dies für unterschiedlichste Aufgaben zeigen ließ.

1.7 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es unterschiedliche Strategien der räumlichen Navigation gibt und dass Männer und Frauen sich wahrscheinlich in ihrer Strategiewahl, beziehungsweise in ihren präferierten räumlichen Informationsquellen unterscheiden, so wie sie sich auch in ihren Leistungen in räumlicher Navigation unterscheiden. Dass sie sich in den Leistungen unterscheiden, könnte mit den unterschiedlichen Strategien zusammenhängen.

Es findet sich allerdings in der Literatur eine allgemeine Problematik der adäquaten Operationalisierung räumlicher Navigation. Dies ist möglicherweise eine Ursache der zum Teil recht widersprüchlichen Forschungsergebnisse bezüglich dieser. Unter anderem gibt es weiterhin Unklarheiten in Bezug auf den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Referenzsystem, räumlichen Repräsentationen und den genutzten Navigationsstrategien. Dies führt auch dazu, dass in vielen Studien zu Geschlechtsunterschieden bei räumlichen Navigationsstrategien nicht klar wird, wie zum Beispiel die Strategien inhaltlich konzeptualisiert sind, was unter Umständen die auftretenden Inkonsistenzen erklären könnte.

Warum, ob und wie Frauen und Männer unterschiedliche Strategien wählen, ist zum jetzigen Zeitpunkt insgesamt noch unklar. Oft werden psychosoziale Aspekte wie etwa gesellschaftliche Geschlechtsstereotypen als Ursache angebracht. Diese wurden auch bereits weitgehend untersucht. Es zeigt sich aber, dass es darüber hinaus anscheinend auch biopsychologische Einflussfaktoren gibt. Eine mögliche Ursache für unterschiedliche Strategiepräferenzen könnten etwa die Sexualhormone sein, da sich zeigen lässt, dass diese mit Leistungen in räumlichen Aufgaben und speziell auch Navigation zusammenhängen. Sogar ein Einfluss auf die Wahl bestimmter Strategien lässt sich für Sexualhormone bis zu einem gewissen Grad zeigen. Sexualhormone wirken im ZNS und modulieren neuronale Aktivierungen.

Man kennt eine Reihe von Hirnregionen, die in räumliche Navigationsaufgaben involviert sind. Allerdings existiert auch hier zum Teil aufgrund der Komplexität des Prozesses, aber eben auch durch die oben erwähnte Problematik der verschiedenartigen Operationalisierung der Aufgaben ein noch recht unklares Bild. Dies gilt ganz besonders für die neuronalen Netzwerke bestimmter Navigationsstrategien.

Die wichtigsten Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Erprobung eines virtuellen Labyrinths zur klaren Strategiedifferenzierung bei räumlicher Navigation, sowie die Überprüfung bisheriger inhaltlicher Vorstellungen über diese Navigationsstrategien. Dazu ist die Untersuchung von Modulatoren dieser Strategien wie Sexualhormone ein wichtiges Ziel. Ebenso werden die neuronalen Aktivierungen während Navigation in Abhängigkeit vom Geschlecht und der verwendeten Strategie, sowie der Einfluss der Sexualhormone auf diese untersucht, da auch dies Einblicke in die Beschaffenheit der Navigationsstrategien verspricht. Schließlich ist es erst möglich Aussagen über Art und Ausmaß der Geschlechtsunterschiede während räumlicher Navigation zu machen, wenn diesbezüglich größere Klarheit herrscht.

2. Studie 1: Navigationsstrategien und der Einfluss von Geschlecht und Sexualhormonen

2.1 Einführung

In bisherigen Studien zu räumlichen Orientierungs- oder Navigationsstrategien beim Menschen wurden diese Strategien in der Regel durch Fragebögen oder Selbstbeschreibungen erfasst (z.B. Lawton, 1994; Choi & Silverman, 2002; Pazzaglia & De Beni, 2001). Erst in neuerer Zeit wird vermehrt versucht, Navigationsstrategien auch verhaltensexperimentell zu trennen (z.B. Iaria et al., 2003; Levy et al., 2005). Auch in der vorliegenden Arbeit wurde eine verhaltensexperimentelle Herangehensweise mit Hilfe eines virtuellen Labyrinths gewählt. In tierexperimentellen Studien werden darin *Place* und *Response Strategies* unterschieden (z.B. Korol et al., 2004). Es wurde nun der Frage nachgegangen, ob man ähnliche verhaltensexperimentelle Strategiedifferenzierungen beim Menschen vornehmen kann und ob diese mit klassischen Fragebogenskalen korrelieren. Dies ist auch deswegen von großer Bedeutung, da in vielen Studien zum Beispiel von Geschlechtsunterschieden in der Strategiepräferenz berichtet wird, diese Strategien aber insgesamt unzureichend spezifiziert sind.

In diesem Kontext wurde der Frage nachgegangen, ob Männer und Frauen sich in der Wahl ihrer Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth unterscheiden und ob Sexualhormone, wie im Tierexperiment bereits gezeigt, eine bestimmte Strategiewahl modulieren. Es wird oftmals beschrieben, dass Frauen eher egozentrische, Männer dagegen eher allozentrische Strategien bevorzugen. Einige Autoren halten die *Place Strategy* für eine allozentrische und die *Response Strategy* für eine egozentrische Strategie (z.B. Schmitzer-Torbert, 2007) ohne dies empirisch zu überprüfen. Es gibt aber auch Autoren die generell anzweifeln, dass man egozentrisch und allozentrisch zum Beispiel mit Routen- und Überblicksstrategie gleich setzen kann (z.B. Gillner & Mallot, 1998). Auch für *Place* und *Response Strategy* kann danach gelten, dass eine Gleichsetzung mit allo- und egozentrisch nicht zwingend gegeben ist. Deswegen ist nicht ganz klar, ob man sagen kann, dass die *Place Strategy* eine allozentrische und also „männliche“ Strategie ist und die *Response Strategy* tatsächlich automatisch eine egozentrische, „weibliche“. Es ist ja zum Beispiel so, dass Östrogen, ein „weibliches“ Hormon, die Wahl einer *Place Strategy* begünstigt (Korol et al., 2004; Quinlan et al., 2008), was mit der Vorstellung, dies sei eine allozentrische Strategie nicht ganz konform geht.

Aufgrund der bisherigen Inkonsistenzen bezüglich der Frage, welche der beiden Strategien „männlich“ oder „weiblich“ sind, wird der Frage nach Geschlechtsunterschieden in der Strategiewahl mit einer ungerichteten Hypothese nachgegangen.

Zusammengefasst hatte diese erste Studie zu Navigationsstrategien drei Ziele: Erstens wird gezeigt werden, dass sich Navigationsstrategien beim Menschen verhaltensexperimentell trennen lassen. Zweitens wurde die gängige Vorstellung auf die Probe gestellt, ob Männer andere Navigationsstrategien präferieren als Frauen und wie diese Strategien inhaltlich zu begreifen sind. Und drittens wurde der Einfluss von Sexualhormonen auf die Strategiewahl überprüft.

Hypothesenherleitung

Männer erbringen oft bessere Leistungen in Orientierungs- und Navigationsaufgaben als Frauen (z.B. Astur, Ortiz, & Sutherland, 1998; Moffat et al., 1998; Sakthivel et al., 1999):

Hypothese 1:

Frauen machen mehr Fehler im Virtuellen Labyrinth als Männer und sind auch langsamer.

In tierexperimentellen Studien zeigte sich bei Testosterondeprivation (zum Beispiel durch Gonadoektomie) eine Verschlechterung der Leistung in Labyrinthaufgaben und eine erneute Verbesserung bei künstlicher Zugabe von Testosteron (z.B. Kritzer et al., 2001). Beim Menschen zeigt sich dementsprechend eine Verbesserung der Leistung im VMWM mit zunehmendem Testosteronlevel (Burkitt et al., 2007; Driscoll et al., 2005)

Hypothese 2:

Testosteron korreliert negativ mit der Anzahl der Fehler und der Durchlaufdauer im Virtuellen Labyrinth.

In tierexperimentellen Studien zeigte sich, dass Nager schlechtere Leistungen im Morris Wasserlabyrinth (MWM) erbringen, wenn Östradiol hoch ist (Galea et al., 1995; Snihur et al., 2008; Rissanen et al., 1999). Der Progesteronmetabolit Allopregnanolon vermindert ebenfalls die Leistung im MWM bei Nagern (Johansson et al., 2002).

Hypothese 3:

Östrogen und Progesteron korrelieren positiv mit der Anzahl der Fehler und der Durchlaufdauer im virtuellen Labyrinth.

Im Tierexperiment konnte gezeigt werden, dass sich anhand des Verhaltens in einem Labyrinth zwei verschiedene Navigationsstrategien differenzieren lassen (z.B. Korol et al., 2004; Quinlan et al., 2008; Zurkovsky et al., 2007), zum Teil auch schon im Humanexperiment (Schmitzer-Torbert, 2007; Etchamendy & Bohbot, 2007; Iaria et al., 2003; Levy et al., 2005).

Hypothese 4:

Es gibt zwei unterschiedliche Strategien räumlicher Navigation, die sich im Fehlerverhalten in einem virtuellen Labyrinth aufzeigen lassen.

Männer und Frauen unterscheiden sich in ihrer Präferenz für Navigationsstrategie (z.B. Lawton, 1994; Choi & Silverman, 2002; Pazzaglia & De Beni, 2001).

Hypothese 5:

Männer und Frauen unterscheiden sich in der Häufigkeit der Wahl einer bestimmten Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth.

In tierexperimentellen Studien konnte gezeigt werden, dass weibliche Ratten eher eine *Place Strategy* wählen, wenn ihre weiblichen Hormone, vor allem Östrogen hoch sind (Korol et al., 2004; Quinlan et al., 2008). Dies sollte sich bei menschlichen Frauen auch zeigen lassen.

Hypothese 6:

Östrogen und Progesteron erhöht bei Frauen die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer *Place Strategy*.

Choi und Silverman (2002) zeigten, dass auch Testosteron die Wahl bestimmter Navigationsstrategien beeinflusst. Testosteron korreliert demnach positiv mit dem Nutzen als männlich betrachteter Routenvariablen in verbalen Beschreibungen und korreliert negativ mit dem Nutzen von Landmarken und relativer (im Gegensatz zu kardinalen) Richtungen jeweils bei Männern, nicht aber bei Frauen (Choi & Silverman, 2002):

Hypothese 7:

Testosteron korreliert bei Männern positiv mit der Häufigkeit der Wahl einer männlichen Navigationsstrategie.

Die Alltags-Strategie-Skala (ASS) (Lawton, 1994; Lawton, 1996; Fitting, 2002) geht von zwei distinkten Orientierungsstrategien aus: einer Routen- und einer Orientierungsstrategie. Diese sollten mit den im Virtuellen Labyrinth gefundenen Navigationsstrategien zusammenhängen, wenn diese eine sinnvolle Unterscheidung darstellen.

Hypothese 8:

Die mittels des Fragebogens ASS ermittelten Strategien der räumlichen Orientierung hängen mit den im Virtuellen Labyrinth gefundenen Strategien zusammen.

2.2 Methode

2.2.1 Probandinnen und Probanden

An der Studie nahmen 63 rechtshändige normalsichtige (zum Teil mit korrigiertem Visus) Studierende unterschiedlicher Fachrichtungen, jedoch keine aus natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen teil. Das durchschnittliche Alter betrug 25,6 Jahre (Range: 20 – 35).

Die Probandinnen und Probanden gehörten zu drei verschiedenen Experimentalgruppen: Die erste Gruppe waren Männer (n=21). Die zweite Gruppe stellten Frauen, die durch die Einnahme hormoneller Kontrazeptiva („Pille“) keiner oder einer geringen hormonellen Schwankung der Sexualhormone über den Menstruationszyklus unterlagen (n=21). Eine dritte Gruppe waren so genannte spontanzyklische Frauen, das heißt Frauen, die keine hormonellen Präparate einnehmen und einen relativ regelmäßigen Zyklus haben (n = 21). Da die Konzentration der Sexualhormone über den weiblichen Zyklus stark variiert (vgl. Abschnitt 1.5.1.2), wurden diese Frauen alle an ihrem 19. bis 23. Zyklustag getestet. Dies entspricht der Luteal- oder Gelbkörperphase des Zyklus, in der die Hormone Östradiol und Progesteron insgesamt relativ hochkonzentriert sind. Da man daher davon ausgehen kann, dass sich die drei Versuchsgruppen in ihrem Hormonstatus deutlich voneinander unterscheiden, eignen sie sich besonders für die Untersuchung des Einflusses von Sexualhormonen.

2.2.2 Versuchsablauf

Die Untersuchungen fanden im Diagnostikraum 2 der Abteilung Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie der Universitätsmedizin Göttingen statt. Vor jeder Untersuchung wurden die Pbn mündlich und schriftlich über den Ablauf der Studie informiert und gaben schriftlich ihre Einwilligung an dieser teilzunehmen. Anschließend wurde die erste Speichelprobe genommen. Da die Untersuchung gemeinsam mit einer anderen Studie zu verbalen Fähigkeiten durchgeführt wurde, bearbeiteten die Pbn anschließend in randomisierter Reihenfolge den Mentalen Rotationstest (MRT)(s. Abschnitt 2.2.3.1), das Virtuelle Labyrinth und zwei Sprachtests. Nach Durchlaufen des Labyrinths wurden den Pbn die Alltags-Strategie-Skala, sowie der Computererfahrungsfragebogen (vgl. Abschnitt 2.2.3.3) vorgelegt. Am Ende wurde die zweite Speichelprobe genommen. Der gesamte Ablauf dauerte etwa 1 ½ Stunden. Für die Teilnahme erhielten die Pbn eine Aufwandsentschädigung von € 10,-. Der Ablauf,

sowie die Inhalte der Studie wurden von der Ethikkommission der Humanmedizinischen Fakultät der Universität Göttingen genehmigt (vgl. Anhang A).

2.2.3 Materialien

2.2.3.1 Mentaler Rotationstest (MRT)

Zur Beurteilung und Einordnung der räumlichen Fähigkeiten der Pbn wurde der Mentale Rotationstest (MRT) nach Peters et al. (1995) eingesetzt. Dieser ist ein zwischen den Geschlechtern differenzierendes und anerkanntes Verfahren zur Erfassung räumlicher Fähigkeiten.

Mentale Rotation ist eine der räumlichen Komponenten, in der sich Männer und Frauen konsistent in ihren Leistungen unterscheiden. Die Papier-und-Bleistift-Version des typischen Vandenberg-und-Kuse-Tests nach Peters et al. (1995) ist ein valides Verfahren zur Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit, bei der Würfelfiguren durch mentales Rotieren in eine Referenzfigur überführt werden müssen. Neben der relevanten Würfelfigur sind vier weitere ähnliche Figuren abgebildet, von denen zwei mit der ersten identisch sind. Die Aufgabe der Pbn besteht darin, diese zwei anzukreuzen. Der Test ist in zwei Teile mit jeweils 12 Items unterteilt, für deren richtige Lösung es jeweils einen Punkt gibt, so dass insgesamt 24 Punkte erreicht werden können. Für die Bearbeitung der ersten 12 Items haben die Pbn drei Minuten Zeit, danach wird zu den nächsten 12 Items gewechselt, für die die Pbn ebenfalls wieder drei Minuten Zeit haben.

2.2.3.2 Virtuelles Labyrinth

Die Trennung der Strategien erfolgte mit Hilfe eines virtuellen Labyrinths. Dieses wurde mittels des 3D-Tools des Experimentalkontrollprogramms *Presentation*[®] (Version 0.71) der Fa. Neurobehavioral Systems programmiert.

In dem Labyrinth (Abb. 7 A und B) gibt es insgesamt zwölf Sackgassen, die mit einer Tür enden. Um das Labyrinth sind große Landmarken (Skyline einer Stadt, ein Turm, Windräder, ein Berg) aufgestellt, die zur Orientierung genutzt werden können (vgl. Abb. 7 C). Das Labyrinth wurde in Anlehnung an die tierexperimentellen Studien zum Einfluss von Sexualhormonen auf Orientierungsstrategien von Korol (Korol et al., 1994; Korol et al., 2004; Korol, 2004) konstruiert. Das im Tierexperiment verwendete Plus-Labyrinth wurde dafür etwas erweitert. So besteht das hier verwendete Labyrinth aus zwei längeren rechtwinklig aufeinander liegenden Hauptachsen, die ein großes Plus bilden und an deren beiden Enden jeweils noch einmal rechtwinklig Nebenachsen

aufliegen und somit noch einmal kleinere Plus-Zeichen bilden (vgl. Abb. 7 D). So entstehen die zwölf Sackgassen. Das Labyrinth ist achsensymmetrisch.

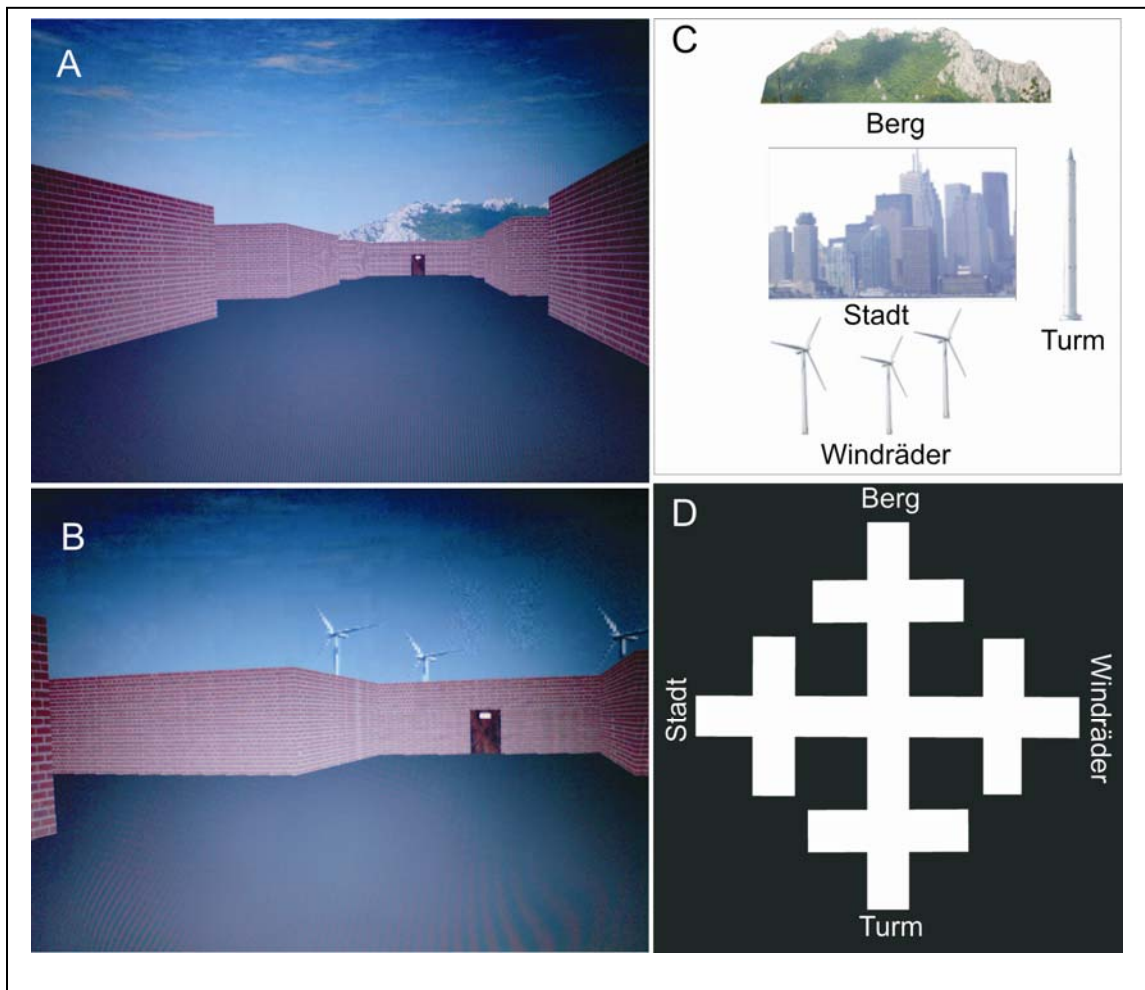


Abb. 7: Virtuelles Labyrinth. Ansicht der Pbn im Labyrinth (A & B). Die vier externen Landmarken Berg, Windräder, Turm, Stadt (C). Anhand des Grundrisses des Labyrinths (D) lässt sich auch ersehen, wo und in welcher Anordnung sich die Landmarken im Labyrinth befinden: jeweils am Ende einer der beiden Hauptachsen.

Die Pbn hatten die Aufgabe in drei Lerndurchgängen durch Exploration den schnellsten Weg von einem Startpunkt zum Ziel (eine sich öffnende Tür) zu finden. Im anschließenden Testdurchgang sollten sie das gelernte Wissen anwenden (vgl. Instruktion Anhang F). Es gab jedoch zwei unterschiedliche Bedingungen: In der einen Bedingung wurden die Pbn im Testdurchgang an einen anderen Startpunkt „gesetzt“. Hier machten diejenigen vermehrt Fehler, die sich ausschließlich am Inneren des Labyrinths orientierten, die externen Hinweisreize in den Lerndurchgängen ignorierten und vielmehr den Weg als solchen memorierten (so genannte *Response Strategy*). In einer zweiten Bedingung blieben Start- und Zielpunkt im Testdurchgang gleich, jedoch wurden die Positionen der externen Landmarken um 90° um das Labyrinth gedreht, so dass diese nicht mehr an ihrem ursprünglichen Platz standen. In dieser Bedingung

machten nun diejenigen vermehrt Fehler, die sich ausschließlich an den externen Landmarken orientierten (*Place Strategy*), da diese nun nicht mehr das Ziel markierten. Ziel dieser Anordnung war es, anhand der Fehler der Pbn in den jeweiligen Bedingungen die beiden Navigationsstrategien (*Place Strategy* versus *Response Strategy*) zu differenzieren.

Zusätzlich zu den zwei Experimentalbedingungen gab es noch eine Kontrollbedingung, in der sich von den Lerndurchgängen zum Testdurchgang nichts änderte. Diese Bedingung ermöglichte es, neben den Strategien räumlicher Navigation auch Leistungsparameter wie Durchlaufgeschwindigkeit und Fehler zu bestimmen. Zur Veranschaulichung der drei Bedingungen beachte Tabelle 1.

Tab. 1: Schematische Darstellung der drei Bedingungen im Virtuellen Labyrinth. S=Startpunkt, Z=Zielpunkt (sich öffnende Tür). Die Veränderungen im Testdurchgang sind jeweils rot dargestellt. Die jeweils nicht erfolgreiche Strategie in der jeweiligen Bedingung führt dazu, dass der Pb zunächst in das mit dem roten Pfeil markierte Segment des Labyrinths laufen würde, so dass er vor „verschlossener Tür“ steht. Dies wird ihm als Fehler zugeschrieben. Anhand der Fehler in den jeweiligen Experimentalbedingungen soll der Pb einer Strategie zugeordnet werden: Fehler in Experimentalbedingung 1 deuten auf eine *Response Strategy* hin, da offensichtlich die Landmarke, die das Ziel markiert, ignoriert wird und der Pb sich offenbar den Weg gemerkt hat (in diesem Fall: links-rechts-links). Fehler in Experimentalbedingung 2 deuten demgegenüber auf eine *Place Strategy* hin, da der Weg ignoriert und lediglich auf die das Ziel kennzeichnende Landmarke (hier: der Turm) geachtet wird.

	Kontrollbedingung	Experimental- bedingung 1: „Umsetzen“	Experimental- bedingung 2: „Landmarken verdreht“
Lerndurchgänge			
Testdurchgang			

Jede Bedingung wurde durch lediglich zwei Trials abgedeckt, da ein Trial (drei Lerndurchgänge und ein Testdurchgang) relativ lange dauerte, besonders wenn sich die Pbn in den ihrer Strategie nicht entsprechenden Testdurchgängen verliefen. Somit gab es für jeden Pb insgesamt sechs Wege zu lernen.

Es ist bekannt, dass es manchmal zu Übelkeit während des Durchlaufens Virtueller Realitäten kommen kann (z.B. Kim, Kim, Eun, Hee, & Hyun, 2005; Cobb & Nichols, 1998). Man spricht hier von Simulatorübelkeit (*simulator sickness*, auch: *virtual reality sickness* oder *cybersickness*), eine Form von Bewegungskrankheit. Vermutlich hängt das Auftreten von Simulatorübelkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb der Virtuellen Realität und dem Blickwinkel ab (Tanaka & Takagi, 2004). Die Dreh- und Durchlaufgeschwindigkeit des hier verwendeten Labyrinths wurde deswegen auf ein Minimum reduziert, das die Bewegung gerade nicht unnatürlich langsam erscheinen ließ. Pilotexperimente zeigten, dass es in dieser Virtuellen Realität nicht zu Simulatorübelkeit kommt, wenngleich diese dennoch nicht vollständig auszuschließen war. Die Pbn wurden deshalb vor Beginn des Experimentes mündlich und schriftlich darüber informiert, dass während des Durchlaufens des Labyrinthes Übelkeitssymptome auftreten können und sie das Experiment in diesem Falle abbrechen können. Allerdings war dies nicht einmal der Fall. Die Pbn saßen mit einem Abstand von etwa 50 cm vom Computerbildschirm entfernt. Die Pbn bewegten sich mittels Joystick⁹ selbstständig durch das Labyrinth.

2.2.3.3 Fragebögen

In vielen Studien werden Strategien räumlicher Orientierung oder Navigation mittels Fragebogen erfasst. Um Ergebnisse solcher Fragebögen mit der verhaltensexperimentellen Erfassung solcher Strategien vergleichen zu können, wurden die Pbn nach den Tests zu ihren individuellen Strategien befragt.

Zunächst wurden sie aber aufgefordert, den Grundriss des Labyrinths aus dem Gedächtnis aufzuzeichnen. Es ist anzunehmen, dass jemand, der Überblickswissen erworben hat, den relativ einfachen Grundriss sicher wieder geben kann, ein anderer, möglicherweise aufgrund einer anderen Strategie, jedoch nicht.

Anschließend füllten die Pbn eine leicht modifizierte Version einer deutschen Übersetzung der *Wayfinding Strategy Scale* von Lawton (1996; 1994) aus, die Alltags-Strategie-Skala (ASS nach Fitting, 2002; Fitting, Glück, & Brehm, 2001, vgl. Anhang B).

⁹ Microsoft® Sidewinder Joystick

Dieser Skala werden zwei theoretische Navigationsstrategien zugrunde gelegt: zum einen eine Routenstrategie und zum anderen eine Orientierungsstrategie. Die Pbn beurteilten beide Dimensionen unabhängig auf fünfstufigen Likertskalen, wobei immer eine Aussage bezüglich eines bestimmten Vorgehens zu beurteilen war. Jede Skala bestand aus acht Einzelitems, so dass insgesamt 16 Aussagen zu beurteilen waren.

Zusätzlich dazu füllten die Pbn noch einen Fragebogen zu ihrer Computererfahrung aus (vgl. Anhang C). Dieser ging aber nicht weiter in die Auswertung ein, abgesehen von der Sicherstellung, dass alle Pbn etwa die gleiche Erfahrung mit Computern haben, was war gegeben.

2.2.4 Speichelproben

Vor und nach jeder Testung wurden Speichelproben genommen. Diese wurden mit Lumineszenzimmunoassay-Kits (LIA-Kits) der Firma IBL¹⁰ auf Östrogen, Progesteron und Testosteron untersucht. Zur Bestimmung der Hormone stellte Prof. Eberhard Fuchs sein Labor im Deutschen Primatenzentrum (DPZ) in Göttingen zur Verfügung. Die Bestimmung der Hormone folgte den von der Firma IBL angegebenen Anweisungen in den jeweiligen Kits, die diese für jedes Hormon einzeln herausgeben und die für die drei Hormone Östrogen, Progesteron und Testosteron unterschiedlich sind.

Das allgemeine Testprinzip beruht jedoch bei allen drei Hormonen auf dem gleichen Grundsatz: An den Wänden der Wells¹¹ auf der im Kit enthaltenen so genannten Mikrotiterplatte ist ein Antikörper gebunden, der sowohl mit dem natürlich im Speichel vorhandenen Antigen (zum Beispiel dem Östrogen-Antigen) als auch mit dem in bekannter Menge hinzugegebenen Antigen im Enzymkonjugat reagiert, so dass zwischen der unbekannt Menge an natürlichem Antigen und der bekannten Menge hinzugefügten Antigens eine Konkurrenz um die Bindungsstellen des Antikörpers entsteht. Nach einer vierstündigen Inkubation auf dem Rüttler werden die nicht gebundenen Anteile des Antigens aus den Wells herausgewaschen. Nach Zugabe der Lumineszenz-Substratlösung kann die Intensität der ausgelösten Lumineszenz in einem Luminometer gemessen werden. Dabei ist diese Intensität umgekehrt proportional zur Antigen-Konzentration in den Proben: Umso mehr Hormon und damit natürliches

¹⁰ <http://www.ibl-hamburg.com>

¹¹ Wells sind wie kleine Plastikbrunnen auf einer Plastikplatte (die Mikrotiterplatte), in denen die Reaktion zwischen Antikörper und Antigen vonstatten geht. Auf den von IBL gelieferten Platten sind 96 solcher wells angebracht, von denen zehn für die Kontrollmischungen verwendet werden müssen.

Antigen in der Probe enthalten war, desto weniger der hinzugegebenen Antigene konnten an die Antikörper binden und damit die Lumineszenzkraft erhöhen.

Die Bestimmung der Sexualhormone diente zum einen dazu, den Einfluss dieser auf die Strategiewahl, sowie die Leistungen in den Tests zu quantifizieren. Zusätzlich stellte dies auch eine Form der Kontrolle dar, da man nicht ganz sicher sein kann, ob man die spontanzyklischen Frauen tatsächlich in der erwarteten Phase getestet hat, der Lutealphase im Menstruationszyklus.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Analyse der Sexualhormone

Die Bestimmung des Östrogens mittels Speichelproben hat sich als schwierig herausgestellt. Aufgrund der Daten erschien es so, als wenn sich Männer und Frauen in der Menge ihres Östrogens im Speichel nicht unterschieden. Dies ist kontraintuitiv und unplausibel. Die Firma IBL hatte bis zu diesem Zeitpunkt ihr Östrogen-Kit nur an weiblichen Probandinnen getestet und die Mängel der Bestimmung noch nicht erkannt. Nach Rücksprache mit IBL wurde festgelegt, die Daten dieser Studie für Östrogen nicht weiter zu analysieren. Eine verbesserte Version der Östrogen-Kits ist inzwischen auf dem Markt. Für die vorliegende Studie war jedoch nicht mehr genug Speichelmaterial vorhanden, um dieses mit den neuen Kits zu analysieren. Somit können keine Aussagen bezüglich Östrogens gemacht werden.

Für Progesteron zeigte sich, dass sich Männer ($M=82.5$ pg/ml; $SD=88.4$) und Frauen ($M=107.6$ pg/ml; $SD=128.2$) in ihren Konzentrationen im Mittel nicht unterschieden [$t_{61}=-.793$; $p=.431$; n.s.]. Einige Männer hatten einen ungewöhnlich hohen Progesteronspiegel. Dies kann zum Beispiel kurzfristig und auf den Speichel beschränkt durch das Trinken von Milch oder aber auch durch bestimmte Hautcremes verursacht werden. Daher wurden zwei Männer, die mehr als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert abweichen, aus einer weiteren Berechnung bezüglich der Sexualhormone ausgeschlossen. Eine Frau, die nicht mittels der üblichen oral verabreichten hormonellen Kontrazeptiva, sondern mit der so genannten Drei-Monatsspritze verhütet, zeigte einen ungewöhnlich hohen Progesteronwert (563.2 pg/ml) an. Diese wurde aus den gesamten weiteren Analysen ausgeschlossen.

Nach dieser Datenbereinigung fanden sich tendenzielle Unterschiede zwischen Männern ($M=59.6$ pg/ml; $SD=53.6$) und Frauen ($M=96.3$ pg/ml; $SD=106.8$) in ihren Progesteronwerten, insofern als dass Frauen höhere Werte aufweisen als Männer [$t=-1.41$; $p=.085$; n.s.] (vgl. Tab.2).

Betrachtet man nicht allein Männer und Frauen, sondern untersucht die drei Gruppen (Männer, Frauen mit hormonellen Kontrazeptiva, spontanzyklische Frauen in ihrer Lutealphase) bezüglich ihres Progesteronspiegels im Speichel, so findet sich ein signifikanter Unterschied etwa zwischen Männern ($M=59.6$ pg/ml; $SD=53.6$) und spontanzyklischen Frauen ($M=150.8$ pg/ml; $SD=123.3$) [$t_{38}=2.98$; $p=.003$; $d=.96$], deren weibliche Hormone in der lutealen Zyklusphase als hoch zu erwarten sind. Die Männer haben im Vergleich mit den spontanzyklischen Frauen einen deutlich niedrigeren Progesteronspiegel. Die spontanzyklischen Frauen haben auch einen signifikant höheren Progesteronspiegel als die Frauen, die hormonell verhüten ($M=35.9$ pg/ml; $SD=22.2$) [$t_{38}=4.2$; $p=.000$; $d=1.30$].

Die Männer ($M=87.7$ pg/ml; $SD=34.3$) wiesen einen hochsignifikant höheren Testosteronspiegel auf als die Frauen ($M=19.0$; $SD=14.9$) [$t_{60}=11.01$; $p=.000$; $d=2.60$], während sich die beiden Frauengruppen nicht in ihren Testosteronwerten unterschieden [$t_{39}=.319$; $p=.752$; n.s.].

Tab. 2: Deskriptive Statistiken der Sexualhormone Progesteron und Testosteron bei Männern und Frauen (gesamt) und Frauen mit hormonellen Kontrazeption und spontanzyklischen Frauen.

	Männer (n=19(P), bzw. 21(T)) Mittelwert (SD)	Frauen gesamt (n=41) Mittelwert (SD)	
		Frauen mit hormonellen Kontrazeptiva (n=20) Mittelwert (SD)	Spontanzyklische Frauen (n=21) Mittelwert (SD)
Progesteron (Speichel, pg/ml)	59.6 (53.6)	96.3 (106.8)	
		35.9 (22.2)	150.8 (123.3)
Testosteron (Speichel, pg/ml)	87.7 (34.3)	19.0 (14.9)	
		18.3 (15.3)	19.8 (14.9)

Die Normwerte, die von der Firma IBL mitgeliefert werden, liegen für Testosteron bei Männern zwischen 41.4 bis 142.5 pg/ml und bei Frauen zwischen 5.5 und 49.0 pg/ml. Für beide Geschlechter liegen die hier gefundenen Werte somit im Normbereich.

Für Progesteron liegen die Normwerte von IBL bei spontanzyklischen Frauen in der Lutealphase zwischen 127 und 446 pg/ml, für postmenopausale Frauen (die an dieser Stelle wie hormonell verhütende Frauen behandelt werden müssen, da keine anderen Normwerte angegeben werden) zwischen 18 und 51 pg/ml. Die Frauen liegen bezüglich Progesterons somit im Normbereich. Bei Männern gibt IBL Normwerte für Progesteron von weniger als 51 pg/ml an. Somit liegen die Männer der vorliegenden Studie etwas über den Normwerten, allerdings in einem tolerablen Bereich.

Es ist dennoch nicht möglich zu entscheiden, ob sich alle spontanzyklischen Frauen tatsächlich in ihrer Lutealphase befanden, wie es geplant war, da die Östrogenwerte nicht verwertet werden können. Eine Phasenbestimmung allein anhand des Progesterons ist als invalide zu betrachten. Da aber die Progesteronwerte für beide Gruppen im Normbereich liegen wird im Folgenden dennoch davon ausgegangen, dass sich alle spontanzyklischen Frauen auch tatsächlich in der Lutealphase befanden. Aufgrund der insgesamt erwartungsgemäßen Verteilung der Sexualhormone Testosteron und Progesteron gingen diese in die weitere Analyse ein.

2.3.2 Strategiedifferenzierung

2.3.2.1 Strategiedifferenzierung durch Virtuelles Labyrinth

Ein Ziel dieser Studie war es zu überprüfen, ob es im Human- genau wie im Tierexperiment möglich ist, räumliche Navigationsstrategien verhaltensexperimentell zu differenzieren. Für die Zuordnung eines Pb zu einer bestimmten Strategiegruppe wurde je ein Navigationsstrategiekoeffizient c_{nav} für diesen errechnet. Die Formel für diesen lautet:

$$c_{nav} = \frac{err_{place} - err_{response}}{err_{all}}$$

err_{place} („Place Strategy-typische Fehler“) ist die Anzahl der Fehler, die in der Bedingung gemacht wurden, in der eine *Place Strategy* zu Fehlern führt, also in der Bedingung, in der die Landmarken im Testdurchgang verdreht wurden. $err_{response}$ („Response Strategy-typische Fehler“) bezeichnet demgegenüber die Summe aller Fehler, die in der Bedingung gemacht werden, in der Fehler für eine *Response Strategy* sprechen, somit in der Bedingung, in welcher der Startpunkt im Testdurchgang verändert wird („Umsetzen“). Die Differenz der Summen beider Fehlerarten wird durch die Anzahl aller Fehler (err_{all}) über alle drei Bedingungen (sechs Durchgänge inklusive Kontrollbedingung) geteilt. Als Fehler galt, sobald der Pb ein für den direkten Weg zum Ziel falsches Segment des Labyrinths betrat, das heißt falsch abbog und damit den direkten Weg zum Ziel verließ. Je weiter sich der Pb vom „richtigen“ Weg entfernte, desto mehr überflüssige Bereiche oder Segmente des Labyrinths betrat er und desto mehr Fehler wurden ihm deswegen angerechnet.

Da die absolute Fehleranzahl (err_{all}) und somit das Ausmaß des Verlaufens von Pb zu Pb unterschiedlich ist, stellt die Errechnung des Navigationsstrategiekoeffizienten eine gut vergleichbare Größe dar, nach der die Differenz beider Fehlerarten durch die Anzahl aller Fehler ins Verhältnis gebracht werden. Ein positiver Koeffizient c_{nav} legt

nahe, dass der Pb hauptsächlich eine *Place Strategy* verwendet hat, während ein negativer für die überwiegende Verwendung einer *Response Strategy* spricht.

Es wurde für jeden Pb ein c_{nav} berechnet. Im Mittel ergab sich dabei ein c_{nav} von -0.127 (SD=.75). Somit kann man sagen, dass eine *Response Strategy* tendenziell häufiger gewählt wurde. Die Verteilung aller Koeffizienten für alle 62 Pbn ist in Abbildung 8 dargestellt.

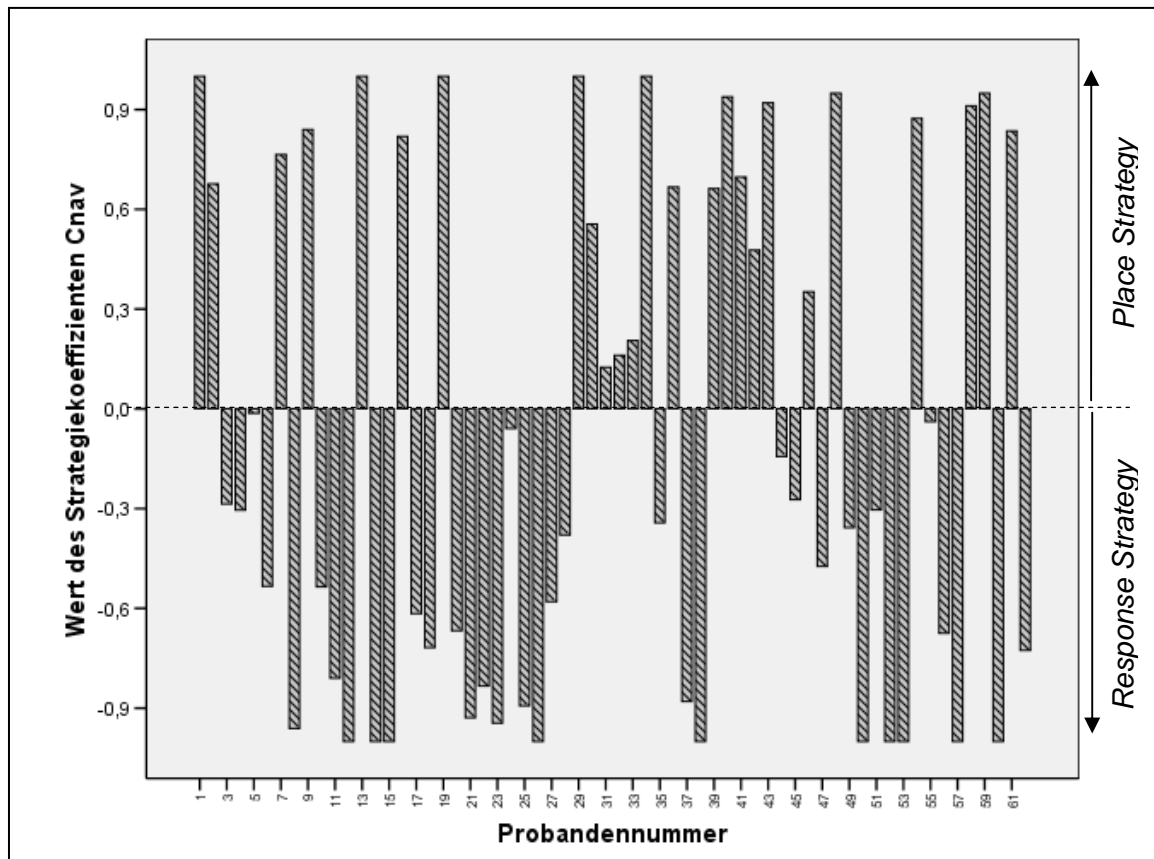


Abb. 8: Verteilung der Strategiekoeffizienten c_{nav} über alle Pbn (die Balken geben den Wert von c_{nav} an). Der Koeffizient errechnet sich anhand der Fehler, die in den beiden Experimentalbedingungen gemacht werden. Durch die Subtraktion der Fehler in der Bedingung „Umsetzen“ von den Fehlern in der Bedingung „Landmarken verdrehen“ ergibt sich, dass ein Proband mit positiven Werten eine *Place Strategy* verfolgt hat, ein Pb mit einem negativen Wert eine *Response Strategy*.

In Abbildung 8 lässt sich bereits erkennen, dass es sowohl Pbn gab, die einen recht hohen positiven Koeffizienten erreicht haben, als auch welche mit einem negativen. Es lässt sich aber auch erkennen, dass einige Pbn einen Wert um Null einnehmen. Das bedeutet, dass sie in beiden Experimentalbedingungen etwa gleich viele Fehler gemacht haben. Mittels einer hierarchischen Clusteranalyse (Average-Verfahren) anhand des Navigationsstrategiekoeffizienten wurden drei inhaltlich sinnvolle Cluster ermittelt (Abb. 9).

Anhand dieser Cluster-Analyse kann man feststellen, dass 21 Pbn der *Place Strategy* zugerechnet werden können und 26 der *Response Strategy*. 15 Pbn konnten keiner

Strategie zugeordnet werden, da sie in beiden Experimentalbedingungen etwa gleich viele Fehler gemacht haben, so dass man davon ausgehen muss, dass diese Pbn ihre Strategie über den gesamten Versuch verändert oder gewechselt haben („Switcher“). Dennoch ist festzuhalten, dass sich die meisten Pbn (47/62) einer Strategie eindeutig zuordnen ließen.

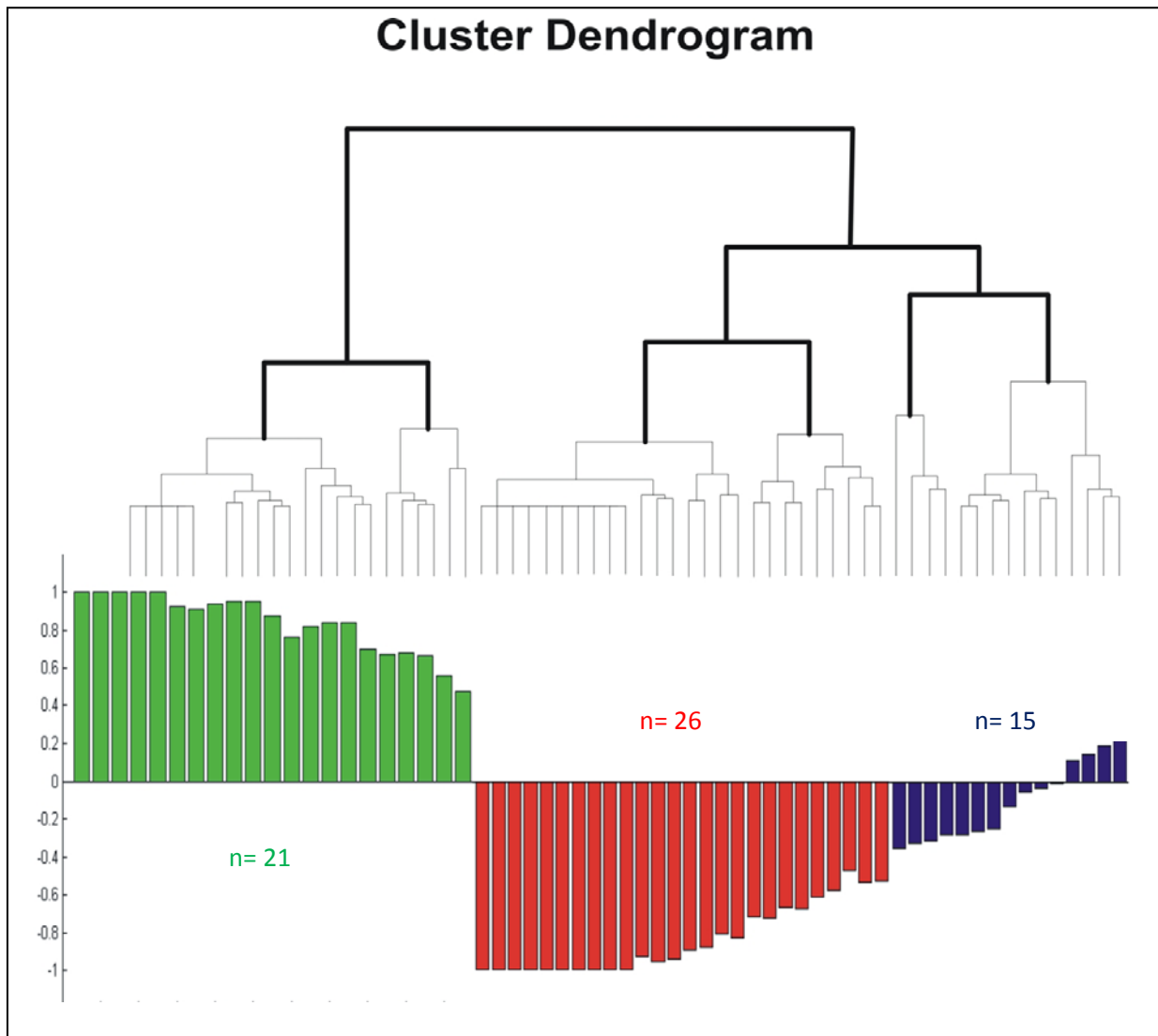


Abb. 9: Cluster-Dendrogramm, anhand dessen die Zuordnung zu den Strategiegruppen stattfindet. Es lassen sich drei inhaltlich sinnvolle Cluster unterscheiden: Pbn mit einem hoch positiven Strategiekoeffizienten (grün) können einer Place Strategy zugeordnet werden. Pbn mit einem hoch negativen c_{nav} (rot) werden einer Response Strategy zugeordnet. Pbn mit einem Wert von c_{nav} um Null (blau) können keiner der beiden Strategien klar zugeordnet werden, sie haben in beiden Bedingungen etwa gleich viele Fehler gemacht und somit vermutlich im Verlauf des Versuchs ihre Strategie geändert („Switcher“).

Eine weitere Möglichkeit der Strategiezuweisung ergibt sich, wenn man wie zum Beispiel Schmitzer-Torbert (2007) die Strategiezuweisung einzig und allein anhand der ersten Experimentalbedingung vornimmt, die ein Pb durchlaufen hat. Je nachdem, welche Bedingung dies war und ob er darin Fehler gemacht hat, kann man sagen, welche Strategie er darin genutzt hat. Man kann davon ausgehen, dass dies der spontanen,

Strategie entspricht, die noch von Misserfolg unbeeinflusst war. Zwar ist die Zuteilung anhand nur eines einzigen Durchgangs als nur bedingt reliabel zu betrachten, dennoch schließt man bei diesem Vorgehen aus, dass man einzelne Pbn keiner Strategie zuordnen kann. Hierbei ist jeder Pb eindeutig einer der beiden Strategiegruppen zuzuordnen. Auf diese Weise kann man 26 Pbn der *Place Strategy* und 36 Pbn der *Response Strategy* zuordnen. Nach diesem Verfahren gibt es somit verhältnismäßig mehr *Response*-Lerner als *Place*-Lerner.

2.3.2.2 Strategiedifferenzierung durch Fragebogen

Zusätzlich zur Differenzierung durch das Labyrinth wurden auch mittels des Strategiefragebogens ASS Strategien erfasst (vgl. Abschnitt 2.2.3.3). In diesem ergeben sich die Rohwerte aus der Summe der Einzelitems pro Skala (Likert-Skala 1 – 5) geteilt durch die Summe aller Items der Skala, die tatsächlich angekreuzt wurden, so dass pro Pb und Skala Werte zwischen 1 und 5 möglich sind¹².

Es fand sich bei der Alltags-Strategie-Skala (ASS) kein Zusammenhang zwischen den beiden Skalen [$r=-.052$; n.s.]. Diese erfassen somit unabhängige Dimensionen der Orientierung und können somit zwischen zwei unabhängigen Strategien differenzieren. In der Gesamtstichprobe ergab sich für die ASS für die Routenstrategie ein mittlerer Wert von $M_{Route}=3.50$ ($SD=.60$) und für die Orientierungsstrategie von $M_{Orient}=2.58$ ($SD=.73$).

2.3.2.3 Strategien im Labyrinth und Strategien erfasst durch Fragebogen

Prüft man den Zusammenhang zwischen den Navigationsstrategiekoeffizienten c_{nav} mit den Werten der einzelnen Skalen der ASS findet sich eine signifikant negative Korrelationen zwischen c_{nav} und der Orientierungsskala der ASS [$r=-.34$; $p=.01$; $R^2=.11$]. Das bedeutet, die Pbn kreuzten umso höhere Werte auf der Orientierungsskala der ASS an, desto niedriger ihr c_{nav} ist, das heißt desto wahrscheinlicher sie eine *Response Strategy* favorisiert hatten (vgl. Tab.3).

Tab.3: Korrelationsmatrix: Zusammenhang zwischen Strategien im Virtuellen Labyrinth (Navigationsstrategiekoeffizient c_{nav}) und Strategien erfasst durch die ASS

	Alltags-Strategie-Skala	
	Route	Orientierung
c_{nav}	$r= -.03$ ($p=.84$)	$r= -.34^*$ ($p=.01$)

¹² Im Folgenden werden die Werte der Skalen wie intervallskalierte Daten behandelt. Die Autorin beruft sich dabei auf Bortz & Döring (Bortz, J. & Döring, N. (2002): Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Heidelberg: Springer.), die dies für vertretbar halten.

2.3.3 Leistungsparameter

2.3.3.1 Geschlechtsunterschiede

Als Leistungsparameter wurden im Virtuellen Labyrinth die Anzahl der Fehler im letzten Durchgang der Kontrollbedingung, sowie die dafür benötigte Zeit in Sekunden erhoben. Da diese beiden Parameter laut eines Kolmogoroff-Smirnoff-Tests nicht normalverteilt sind, wurde der Gruppenvergleich anhand eines U-Tests nach Mann und Whitney gerechnet.

Es ließen sich keine Leistungsunterschiede zwischen den Geschlechtern finden (vgl. Tab. 4). Beide Geschlechter wiesen einen Medianwert für die Anzahl der Fehler von 0 auf [U=405.5; z=.441; p>.10]. Die Männer haben für die Zeit im letzten Durchgang der Kontrollbedingung einen Median von Med= 22.83s, die Frauen einen von Med= 26.77s [U=389.0; z=.617; p>.10]. Dieser Unterschied ist nicht signifikant.

Tab.4: Deskriptive Statistiken Leistungsparameter nach Geschlecht, mit Inferenzstatistik Gruppenvergleich (U-Test).

	Anzahl Fehler im Labyrinth (Kontrollbedingung)	U-Wert	Mittlere Durchlaufzeit in s im Labyrinth (Kontrollbedingung)	U-Wert
Männer (n=21)	Med=0	405.5 (p= .33)	22.83	389.0 (p=.27)
Frauen (n=41)	Med=0		26.77	

2.3.3.2 Zusammenhang mit Sexualhormonen

Aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Leistungsparameter im Virtuellen Labyrinth wurden zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Leistung und Hormonen Spearman-Rangkorrelationen gerechnet. Die in die Analyse eingehenden Sexualhormone (das heißt Progesteron und Testosteron) hatten keinen Einfluss auf die Leistungen im Virtuellen Labyrinth, weder bezüglich der benötigten Zeit (Testosteron: [r=-.09; p=.48; n.s.], Progesteron: [r=.02; p=.91; n.s.]), noch bezüglich Fehlern im Kontrolldurchgang (Testosteron: [r=-.07; p=.60; n.s.], Progesteron: [r=-.04; p=.78; n.s.]).

Innerhalb der Gruppe der Männer zeigte sich jedoch eine signifikante negative Korrelation zwischen der benötigten Zeit im Labyrinth und dem Testosteronlevel [r=-.447; p=.042, R²=.269], jedoch keine signifikante zwischen den Fehlern in der Kontrollbedingung und dem Testosteronlevel [r=-.194; p=.40; n.s.]. Das bedeutet, je mehr Testosteron die Männer im Speichel hatten, desto schneller liefen sie durch das Labyrinth.

Innerhalb der Frauen fand sich kein Zusammenhang für Testosteron (Zeit <-> Testosteron [$r=.055$; $p=.733$; n.s.] Fehler <-> Testosteron [$r=.009$; $p=.957$; n.s.]) oder Progesteron (Zeit <-> Progesteron [$r=.017$; $p=.917$; n.s.] Fehler <-> Progesteron [$r=.008$; $p=.963$; n.s.]).

2.3.3.3 Fragebogen

Der einzige Leistungsparameter, der mittels Fragebogen erhoben wurde, war die freie zeichnerische Wiedergabe des Grundrisses des Labyrinths. Als „richtig“ klassifiziert wurden Zeichnungen, die eindeutig erkennen ließen, dass der Grundriss in seiner Grundstruktur wahrgenommen und behalten wurde. Dabei kam es nicht auf die zeichnerische Genauigkeit an, sondern nur darauf, dass deutlich wird, dass es zwei Hauptachsen gibt, die rechtwinklig zueinander liegen und an deren beiden Enden jeweils zwei Nebenachsen rechtwinklig aufliegen (vgl. Abb. 7).

Männer und Frauen unterschieden sich nicht in der Häufigkeit der richtigen Wiedergabe des Grundrisses, wengleich Männer im Verhältnis den Grundriss etwas häufiger richtig wiedergaben als Frauen [$\chi^2=1.63$; $df=1$; $p=.201$] (vgl. Tab.5).

Auch die drei Experimentalgruppen unterschieden sich nicht in der Häufigkeit der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses [$\chi^2=1.69$; $df=2$; $p=.429$] (vgl. Tab.6).

Tab. 5: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=1.63$; $df=1$; $p=.201$		Geschlecht		Randsumme
		Männer	Frauen	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	9 (6,8)	11 (13,2)	20
	nein	12 (14,2)	30 (27,8)	42
Randsumme		21	41	62

Tab. 6: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die drei Experimentalgruppen. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=1.69$; $df=2$; $p=.429$		Experimentalgruppe			Randsumme
		Männer	Frauen mit hormonellen Kontrazeptiva	Spontanzyklische Frauen	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	9 (6,8)	5 (6,5)	6 (6,8)	20
	nein	12 (14,2)	15 (13,5)	15 (14,2)	42
Randsumme		21	20	21	62

2.3.4 Strategiewahl

2.3.4.1 Geschlechtsunterschiede

Die Strategiekoeffizienten c_{nav} (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) unterschieden sich nicht bei Männern und Frauen. Männer hatten im Mittel einen c_{nav} -Wert von $M=-.29$ ($SD=.67$), Frauen einen von $M=-.05$ ($SD=.78$). Somit tendierten Männer zwar eher als Frauen zu einer *Response Strategy* (negativer c_{nav} -Wert), dieser Unterschied ist aber nicht signifikant [$t_{60}=1.19$; $p=.12$; n.s.].

Betrachtet man mittels χ^2 -Test die Verteilung von Geschlecht und Strategiegruppe anhand der Zuteilung aufgrund der ersten Experimentalbedingung, so zeigt sich ein gewisser, wenn auch nicht signifikanter Zusammenhang zwischen Geschlecht und Strategiewahl [$\chi^2= 2.33$, $df=1$, $p=.127$] (Tab.7). Männer wählten demnach etwas häufiger als Frauen eine *Response Strategy*, Frauen demgegenüber etwas häufiger als Männer eine *Place Strategy*. Innerhalb der Frauengruppe waren beide Strategien gleich verteilt: Etwa die Hälfte aller Frauen wählten eine *Place*, die andere Hälfte eine *Response Strategy*.

Tab. 7 Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung (χ^2 -Test) von Strategiezuweisung anhand der ersten Experimentalbedingung zum Geschlecht. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2= 2.33$, $df=1$, $p=.127$		Im ersten Trial gewählte Strategie		Randsummen
		Place Strategy	Response Strategy	
Geschlecht	männlich	6 (8,8)	15 (12,2)	21
	weiblich	20 (17,2)	21 (23,8)	41
Randsummen		26	36	62

2.3.4.2 Zusammenhang mit Sexualhormonen

Obwohl sich der Strategiekoeffizient zwischen den Geschlechtern nicht unterschied, ließ sich ein Zusammenhang mit der Hormonkonzentration zeigen. Für Testosteron fand sich zwar kein Zusammenhang [$r=-.05$; $p=.72$; n.s.], jedoch zeigte sich ein Zusammenhang zwischen den Progesteronwerten und der Höhe des Navigationsstrategiekoeffizienten c_{nav} [$r=.308$; $p=.018$; $R^2=.1$].

Betrachtet man nur die Gruppe der spontanzyklischen Frauen, welche die größte Varianz im Progesteronspiegel aufwies, so zeigte sich, dass sich eine höhere Korrelation bei einer Varianzaufklärung von über 40 % in dieser Gruppe zeigte [$r_{\text{FrauenohnePille}}=.65$; $p=.001$; $R^2=.42$] (Abb.10).

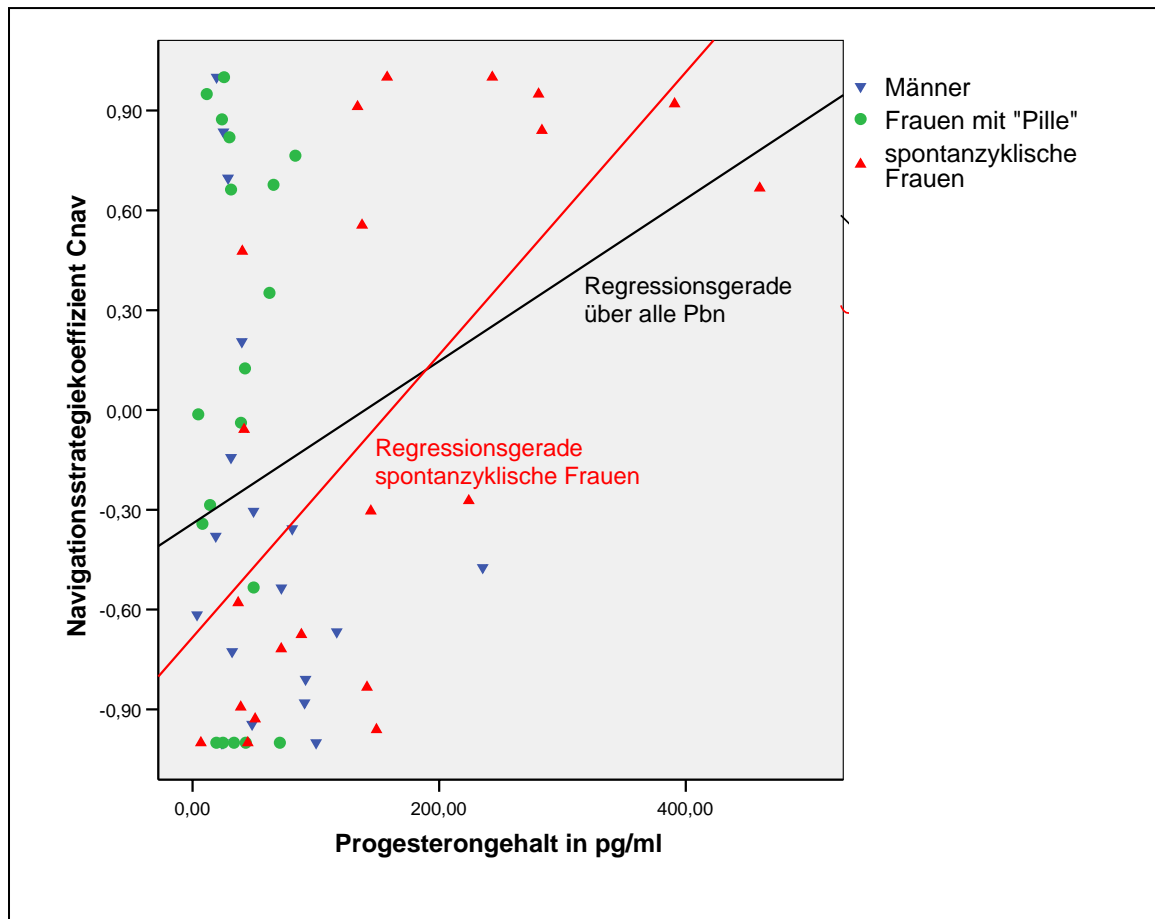


Abb. 10: Zusammenhang zwischen dem Navigationsstrategiekoeffizienten c_{nav} und der Progesteronkonzentration im Speichel zum Zeitpunkt der Testung (schwarz). Nimmt c_{nav} einen positiven Wert ein, überwiegt eine Place Strategy, nimmt er einen negativen Wert ein, überwiegt eine Response Strategy. Die größte Streuung im Progesteron Gehalt weisen spontanzyklische Frauen (rot) auf. Innerhalb dieser Gruppe findet sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen c_{nav} und Progesteron mit über 40 % Varianzaufklärung.

Betrachtet man hingegen die beiden anderen Gruppen, in denen Progesteron verhältnismäßig wenig vorhanden und somit auch eine geringere Varianz zu erwarten war, so verschwindet die gefundene Korrelation zwischen c_{nav} und Progesteron [$r_{\text{Männer}} = -.27$; $p = .260$; n.s.] [$r_{\text{FrauenmitPille}} = .037$; $p = .88$; n.s.]. Das bedeutet, je höher der Progesteronspiegel im Speichel spontanzyklischer Frauen, desto höher war ihr Navigationsstrategiekoeffizient, das heißt desto wahrscheinlicher wählten sie eine *Place Strategy*. Je niedriger der Progesteronspiegel, desto niedriger c_{nav} , das heißt desto eher wurde eine *Response Strategy* gewählt. Für die anderen beiden Experimentalgruppen zeigte sich das so nicht.

Die drei Experimentalgruppen (Männer, hormonell verhütende Frauen, spontanzyklische Frauen) unterschieden sich ebenfalls nicht in ihrem c_{nav} -Wert. Wie oben bereits erwähnt haben Männer einen mittleren c_{nav} -Wert von $M = -.29$ ($SD = .67$), hormonell verhütende Frauen einen von $M = -.05$ ($SD = .77$) und spontanzyklische

Frauen einen von $M = -.04$ ($SD=.80$). Eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse ergab keinen Unterschied zwischen den Gruppen [$F_{(2)}=.70$; $p=.50$; n.s.].

Aufgrund der alternativen Strategiezuteilung nur anhand der ersten Experimentalbedingung kann man einen χ^2 -Test bezüglich der Häufigkeit der Strategien pro Experimentalgruppe (Männer, hormonell verhütende Frauen, spontanzyklische Frauen) rechnen. Dieser zeigte (vgl. Tab.8), dass sich Männer und Frauen, die mittels hormoneller Kontrazeptiva verhüten, in der Häufigkeit der Wahl einer bestimmten Strategie nicht unterschieden und nahezu den erwarteten Häufigkeiten entsprechen. Demgegenüber wichen die spontanzyklischen Frauen deutlich von den erwarteten Häufigkeiten ab und wählten deutlich häufiger eine *Place Strategy* als eine *Response Strategy*, obwohl über die Gesamtstichprobe gesehen, die *Response Strategy* verbreiteter ist. Über alle drei Gruppen wird der Test nicht signifikant, zeigt aber eine deutliche Tendenz an [$\chi^2= 5.38$, $df=2$, $p=.068$].

Tab. 8: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung (χ^2 -Test) von Strategiezuteilung anhand der ersten Experimentalbedingung zu den drei Experimentalbedingungen. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2= 5.38$, $df=2$, $p=.068$		Im ersten Trial gewählte Strategie		Randsumme n
		Place Strategy	Response Strategy	
Gruppe	Männer	6 (8,8)	15 (12,2)	21
	Frauen mit hormonellen Kontrazeptiva	7 (8,4)	13 (11,6)	20
	Spontanzyklische Frauen	13 (8,8)	8 (12,2)	21
Randsummen		26	36	62

Wenn man noch einmal die alternative Strategiezuteilung nur anhand der ersten Experimentalbedingung betrachtet, zeigte sich, dass sich die beiden Strategiegruppen signifikant in ihrem Progesteronspiegel unterschieden. Die Pbn, die zunächst eine *Place Strategy* wählten ($n=24$) wiesen im Mittel einen Progesteronwert von 131.4 pg/ml auf ($SD=123.5$), diejenigen, die als erstes eine *Response Strategy* ($n=35$) wählten, demgegenüber einen Progesteronwert von im Mittel 52.3 pg/ml ($SD=46.5$) [$t=2.76$; $p=.01$; $d=.85$](Abb.11).

Jedoch zeigte sich auch hier, dass dieser Unterschied verschwindet, wenn man nur die Männer und die hormonell verhütenden Frauen in die Analyse einbezieht [$t=.697$; $p=.49$; n.s.] und dass der Unterschied noch stärker wird, wenn man allein die spontanzyklischen Frauen testet [$t_{19}=3.36$; $p=.003$; $d=1.66$].

Für Testosteron fand sich auch nach dieser Berechnung kein Zusammenhang zwischen Strategie und Testosteronlevel [$t_{60}=1.03$; $p=.15$; n.s.]. Man kann aber sagen, dass in der Gruppe der *Place Strategy* etwas niedrigere Testosteronwerte zu finden waren ($M_{Place}=36.1$ pg/ml; $SD_{Place}=37.3$) als in der Gruppe der *Response Strategy* ($M_{Response}=46.8$; $SD_{Response}=41.9$), allerdings bei recht hohen Standardabweichungen. Auch wenn man nur die Gruppe der Männer betrachtete, unterschieden sich die beiden Strategiegruppen nicht in ihrem Testosteronlevel [$t_{19}=.30$; $p=.38$; n.s.].

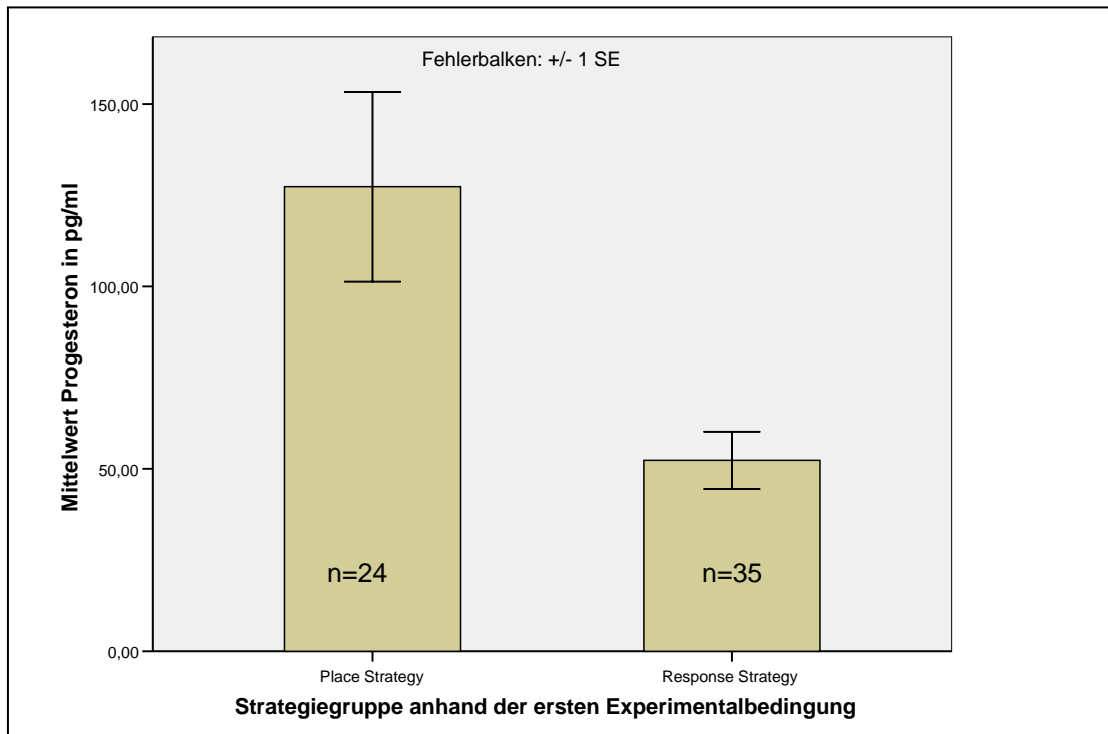


Abb. 11: Mittleres Progesteronlevel in pg/ml in den einzelnen Strategiegruppen (Zuteilung anhand der ersten Experimentalbedingung) ($M_{Place}=131.35$; $SD_{Place}=123.5$; $M_{Response}=52.30$; $SD_{Response}=46.5$) Dass hier nur insgesamt 59 Pbn verarbeitet wurden liegt an den zwei Männern, die aufgrund zu hoher Progesteronwerte aus der Analyse herausfallen.

Tab. 9: Deskriptive Statistiken Strategiewahl für alle drei Experimentalgruppen, sowie die Geschlechter und die Gesamtstichprobe. c_{nav} = Navigationsstrategiekoeffizient (positiver Wert=Place Strategy überwiegt, negativer Wert=Response Strategy überwiegt)

	Mittlerer Wert von c_{nav} (SD)	Strategiezuordnung anhand der ersten Experimentalbedingung	
		Häufigkeiten Place Strategy	Häufigkeiten Response Strategy
Männer (n=21)	-.29 (SD=.67)	6	15
Frauen gesamt (n=41)	-.05 (SD=.78).	20	21
Frauen mit hormonellen Kontrazeptiva (n=20)	-.05 (SD=.77)	7	13
Spontanzyklische Frauen (n=21)	-.04 (SD=.80)	13	8
Gesamtstichprobe (n=62)	-.127 (SD=.75)	26	36

2.3.4.3 Fragebogen

Männer und Frauen unterschieden sich kaum in ihren Selbsteinschätzungen in dem Navigationsstrategiefragebogen Alltags-Strategie-Skala (ASS) (vgl. Tab.10), außer in der Subskala *Orientierungsstrategie*. Hier schätzten sich Männer (M=2.92; SD=.80) signifikant höher ein als Frauen (M=2.40; SD=.64) [$t_{59}=2.791$; $p=.004$; $d=.73$].

Die drei Experimentalgruppen unterschieden sich nur wenig in ihren Einschätzungen. Auf der Skala *Orientierungsstrategie* der ASS fanden sich erneut signifikante Unterschiede zwischen den Männern und den jeweiligen Frauengruppen: Männer schätzten sich auf dieser Skala sowohl signifikant höher ein als die hormonell verhütenden Frauen [$t_{39}=2.24$; $p=.020$; $d=.70$] als auch als die spontanzyklischen Frauen [$t_{39}=2.37$; $p=.012$; $d=.74$]. Ferner schätzten sich spontanzyklische Frauen signifikant höher auf der Skala *Routenstrategie* der ASS ein als hormonell verhütende Frauen [$t_{38}=1.69$; $p=.05$; $d=.53$] (vgl. Tab.11).

Tab.10: Deskriptive Statistiken bezüglich der Einschätzungen im Navigationsstrategiefragebogen Alltags-Strategie-Skala (ASS) nach Geschlechtern. Daneben Inferenzstatistiken (t-Test) für den Mittelwertsvergleich zwischen beiden Geschlechtern. Die Mittelwerte der signifikanten Unterschiede sind fett gedruckt.

Subskala der ASS	Männer (n=21)	Frauen (n=41)	t-Wert (df=59)	Signifikanz (p-Wert)
	Mittlere Einschätzung von 1-5 (SD)	Mittlere Einschätzung von 1-5(SD)		
Route	3.49 (.51)	3.51 (.65)	-.075	.470
Orientierung	2.92 (.80)	2.40 (.64)	2.79*	.004

Tab.11: Deskriptive Statistiken bezüglich der Einschätzungen im Navigationsstrategiefragebogen Alltags-Strategie-Skala (ASS) nach Experimentalgruppen. Anhand eines t-Tests als signifikant beurteilte Unterschiede sind durch ein > oder < gekennzeichnet.

Subskala der ASS	Männer (n=21)	Frauen mit „Pille“ (n=20)	Spontanzyklische Frauen (n=21)
	Mittlere Einschätzung von 1-5 (SD)	Mittlere Einschätzung von 1-5(SD)	Mittlere Einschätzung von 1-5(SD)
Route	3.49 (.51)	3.34 (.56)	3.68 (.70)
Orientierung	2.92 (.80)	2.41 (.67)	2.39 (.62)

Eine einfaktorielle multivariate Varianzanalyse zeigte keinen Effekt der Zugehörigkeit zu einer der drei Experimentalbedingungen an [$F=1.63$; $p=.125$; $\eta^2=.106$], wengleich eine gewisse Tendenz zu erkennen ist. Die post-hoc-Tests (Scheffé) zeigten ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse (anders als die t-Tests), zeigten aber an den

gleichen Stellen wie der t-Test zumindest eine gewisse Tendenz: im direkten Paarvergleich von Männern und hormonell verhütenden Frauen.

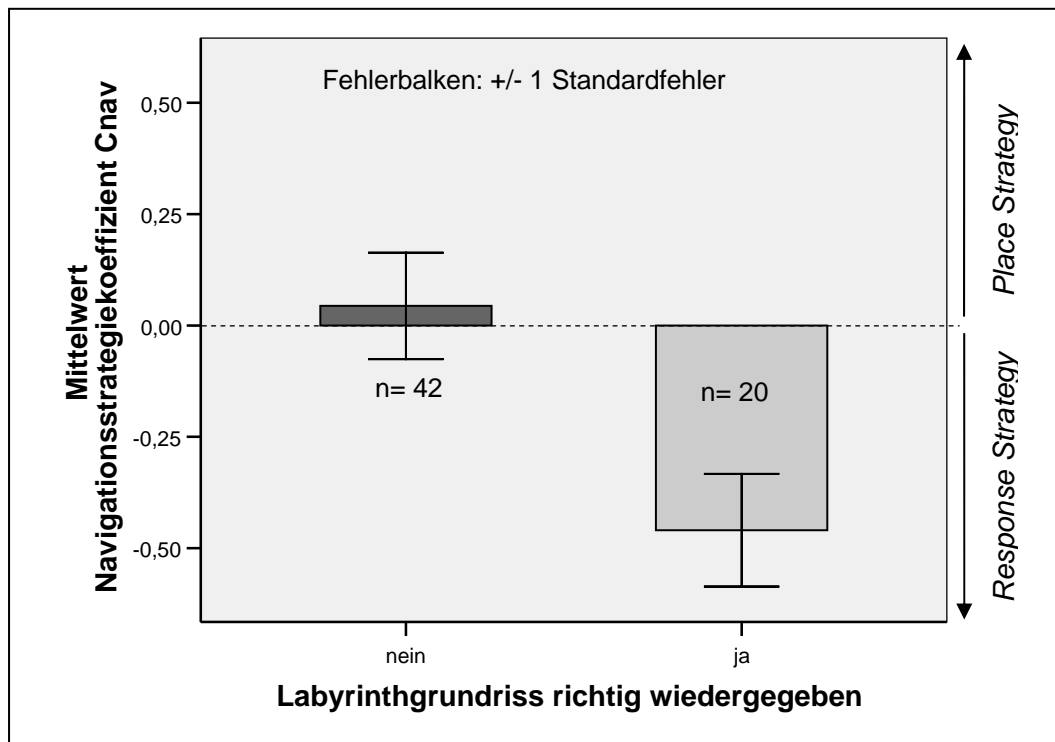


Abb. 12: c_{nav} nach richtiger Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses: Pbn, die den Grundriss nicht richtig zeichnerisch wiedergeben konnten ($n=42$) haben im Mittel einen c_{nav} von $M=.04$. Die wenigen Pbn ($n=20$), die den Grundriss korrekt wiedergeben konnten, haben im Mittel jedoch einen c_{nav} von $M=-.49$. Das heißt, wer eine Response Strategy gewählt hat, kann mit höherer Wahrscheinlichkeit den Grundriss richtig wiedergeben als jemand, der eine Place Strategy gewählt hat.

Pbn, die eine *Response Strategy* wählten, gaben signifikant häufiger den Grundriss des Labyrinths im Fragebogen richtig wieder im Vergleich zu Pbn, die eine *Place Strategy* wählten: Die Höhe des Navigationsstrategiekoefizienten c_{nav} korreliert punkt-biserial signifikant und negativ mit der richtigen Reproduktion des Grundrisses (richtig = 1, falsch = 0) [$r=-.334$; $p=.008$]. Das heißt, dass ein hoher Navigationsstrategiekoefizient c_{nav} ($\hat{=}$ *Place Strategy*) mit einer schlechten Reproduktion des Labyrinth-Grundrisses einhergeht, während ein niedriger c_{nav} ($\hat{=}$ *Response Strategy*) mit einer guten zusammenhängt. Ein t-Test kommt zum gleichen Ergebnis: Pbn, die den Grundriss richtig wiedergaben, wiesen einen niedrigeren, das heißt negativen Navigationsstrategiekoefizienten c_{nav} auf ($M=-.49$; $SD=.55$) als Pbn, die den Grundriss falsch wiedergaben ($M=.04$; $SD=.77$) [$t_{60}=2.75$; $p=.004$; $d=.79$] (Abb. 12).

Im χ^2 -Test mit der Strategiezuordnung anhand der ersten Experimentalbedingung zeigt sich ebenfalls eine signifikant unterschiedliche Verteilung [$\chi^2=8.8$; $df=1$; $p=.003$] (vgl. Tab.12).

Tab. 12: Kreuztabelle. Häufigkeit der richtigen Wiedergabe des Labyrinthgrundrisses in Bezug auf die bevorzugte Strategie im Virtuellen Labyrinth anhand der Strategiewahl in der ersten Experimentalbedingung (χ^2 -Test). Die Zahlen in Klammern geben die erwarteten Häufigkeiten wieder.

$\chi^2=8.8; df=1; p=.003$		Im ersten Trial gewählte Strategie		Randsumme
		Place Strategy	Response Strategy	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	3 (8,4)	17 (11,6)	20
	nein	23 (17,6)	19 (24,4)	42
Randsumme		26	36	62

2.3.5 Mentaler Rotations Test (MRT)

2.3.5.1 Geschlechtsunterschiede

Im Mentalen Rotations Test (MRT) zeigten die Männer ($M=12.48; SD=3.1$) signifikant bessere Leistungen als die Frauen ($M=9.07; SD=3.9$) [$t_{59}=3.47; p=.001; d=.97$] (vgl. Abb. 13).

Peters, Lehmann, Takahira, Takeuchi und Jordan (2006) fanden für Männer in nicht-naturwissenschaftlichen Fächern über kanadische ($n=1095$), deutsche ($n=214$) und japanische ($n=352$) Stichproben Mittelwerte zwischen 11.2 und 12.7 und für Frauen zwischen 8.3 und 9.4 bei einer totalen Stichprobengröße von insgesamt $N=1661$. Die Werte für Männer und Frauen in der vorliegenden Studie entsprachen somit den für nicht-naturwissenschaftliche Fächer typischen Werten.

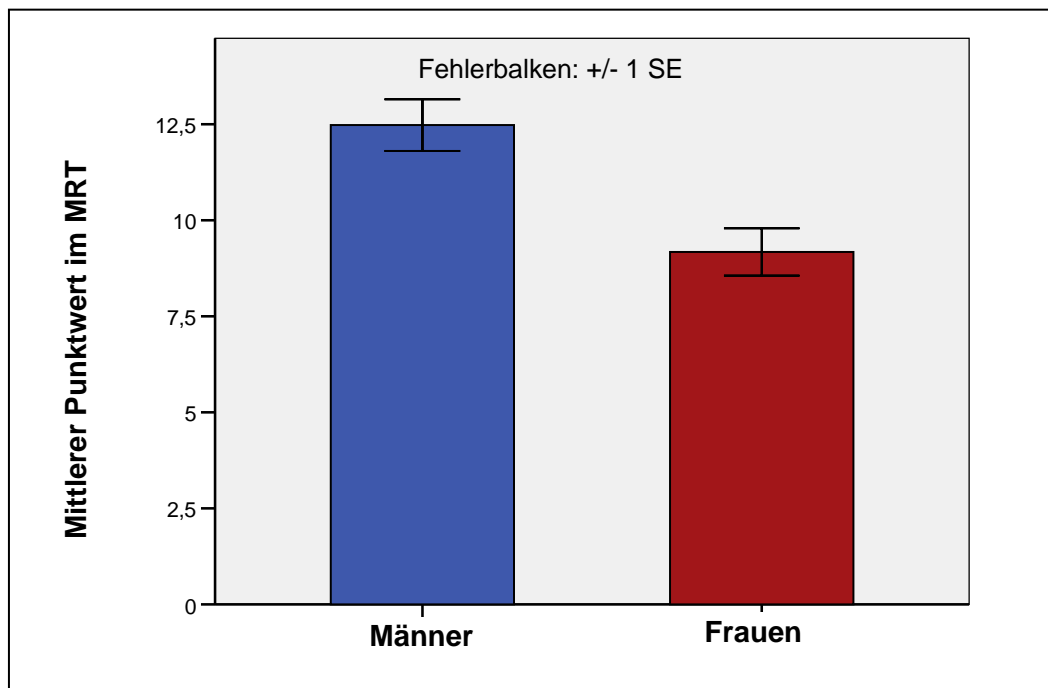


Abb. 13: Ergebnisse für den MRT bei Männern ($n=21; M=12.48; SD=3.1$) und Frauen ($n=41; M=9.07; SD=3.9$). Männer zeigen signifikant bessere Leistungen im MRT als Frauen [$t_{59}=3.47; p=.001; d=.97$].

2.3.5.2 Zusammenhang mit Sexualhormonen

Es fand sich für den MRT ein positiver Zusammenhang zwischen Testosteron und Leistungswerten im Test [$r=.46$; $p=.000$; $R^2=.21$] über alle Pbn, aber vor allem in der Gruppe der Männer [$r=.585$; $p=.005$; $R^2=.34$] (vgl. Abb.14). Dies ist konsistent mit Ergebnissen anderer Autoren (z.B. Silverman, Kastuk, Choi, & Phillips, 1999). In der Gruppe der hormonell verhütenden Frauen fand sich keine Korrelation zwischen MRT und Testosteron [$r=.032$; $p=.89$; n.s.], ebenso in der Gruppe der spontanzyklischen Frauen [$r=.013$; $p=.956$; n.s.]. Für Progesteron ließ sich kein Zusammenhang zu den Leistungen im MRT finden [$r=-.139$; $p=.297$; n.s.].

Die beiden Frauengruppen, die die hormonell verhüten ($M=9.45$; $SD=4.2$) und die spontanzyklischen ($M=8.71$; $SD=3.6$), unterschieden sich nicht in ihren Leistungen im MRT [$t_{39}=.598$; $p=.277$; n.s.].

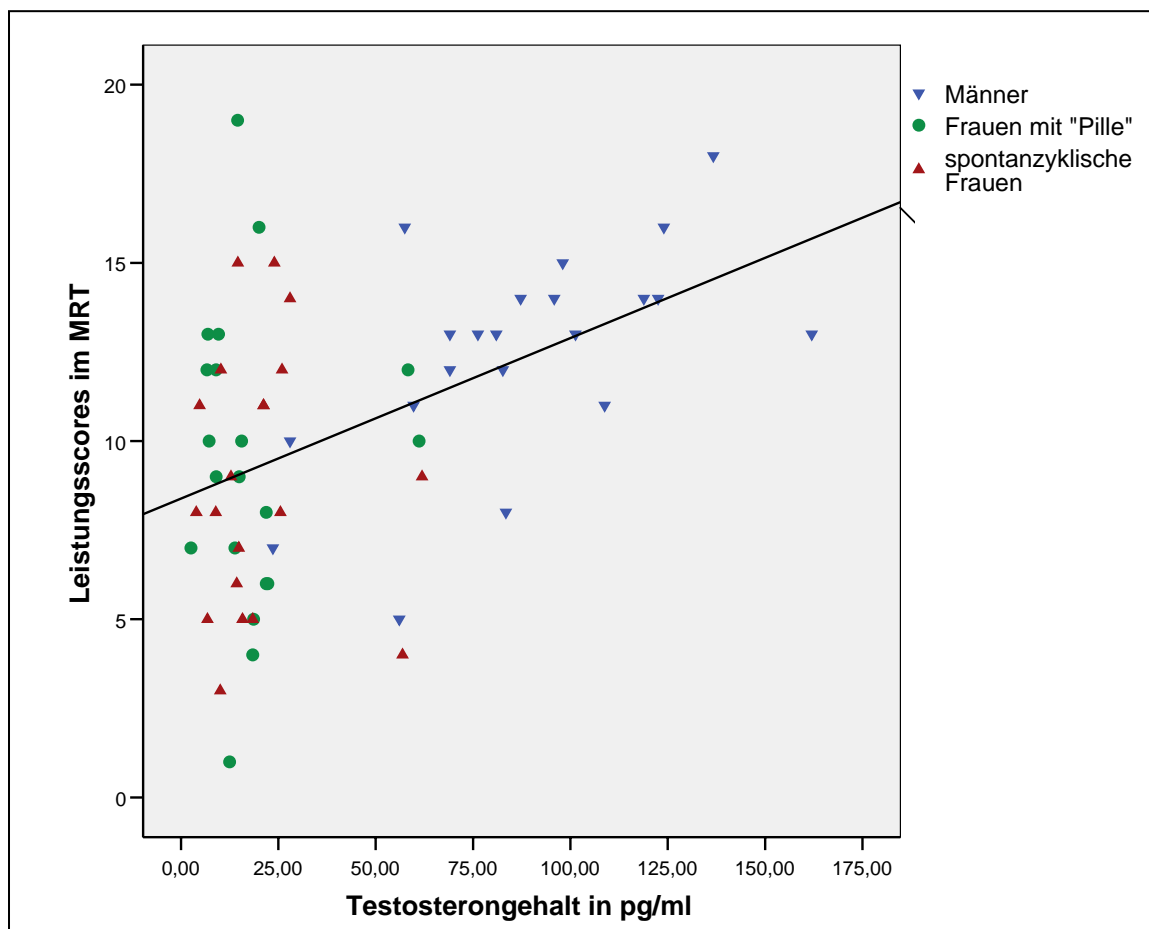


Abb. 14: Zusammenhang zwischen Testosteronkonzentration im Speichel und den Leistungsscores im Mentalen Rotationstest (Höchstwert: 24). Über die Gesamtstichprobe fand sich eine positive Korrelation zwischen Testosteronergehalt im Speichel und den Leistungsscores im MRT von $r=.46$. Innerhalb der Gruppe der Männer, innerhalb der sie größte Testosteronvarianz zu erwarten ist, findet sich sogar eine Korrelation von $r=.585$.

2.3.5.4 Zusammenhang MRT und Virtuelles Labyrinth

Die Punktwerte im MRT korrelieren zu $r=-.15$ ($p=.25$) mit der Durchlaufdauer und zu $r=-.14$ ($p=.27$) mit den Fehlern im Labyrinth, jeweils nur in der Kontrollbedingung. Es besteht somit kein Zusammenhang zwischen den Leistungen im Labyrinth und den Leistungen in Mentaler Rotation.

Die Leistungen im MRT hingen auch nicht mit der bevorzugten Strategie zusammen. Die Werte im MRT korrelieren zu $r=.035$ ($p=.791$) mit c_{nav} . Ein t-Test zwischen den Strategieguppen anhand der ersten Experimentalbedingung kommt allerdings zu einem signifikanten Ergebnis: Pbn, die eine *Place Strategy* im ersten Experimentaldurchgang präferierten, erzielten signifikant schlechtere Ergebnisse im MRT ($M_{Place}=9.04$; $SD=4.40$) als Pbn, die eine *Response Strategy* bevorzugten ($M_{Response}=11.26$; $SD=3.33$) [$t_{59}=2.25$; $p=.015$; $d=.40$] (vgl. Abb. 15).

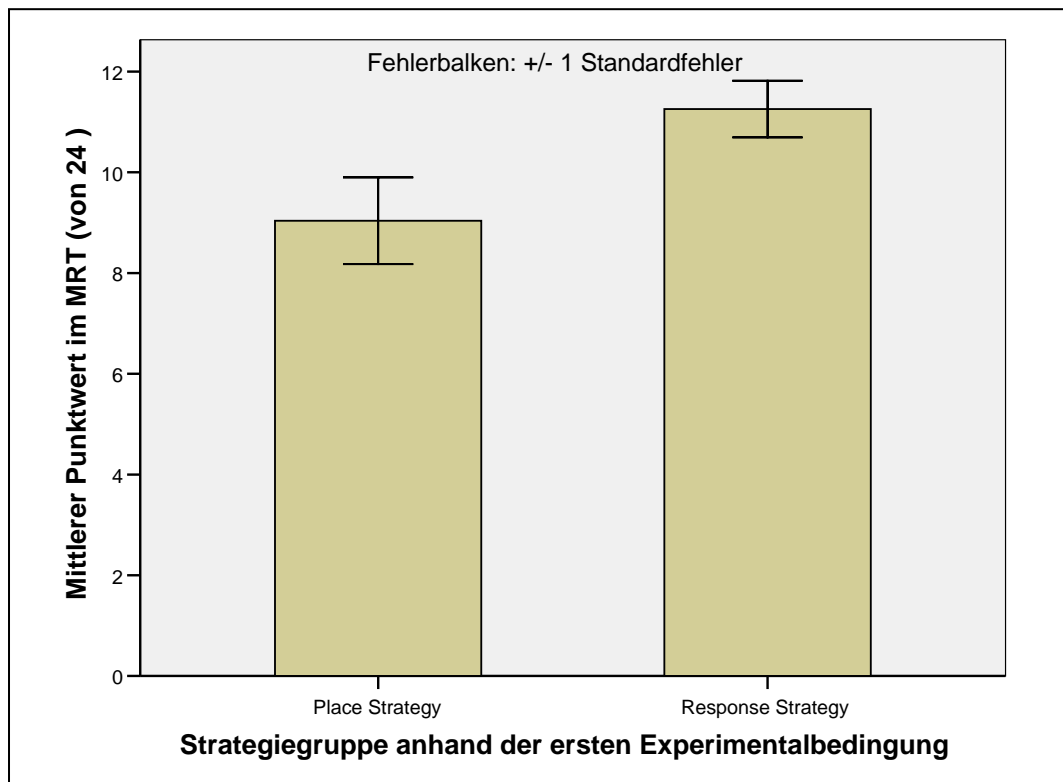


Abb. 15: Zusammenhang Leistung im Mentalen Rotationstest mit der in der ersten Experimentalbedingung gewählten Strategie: Pbn, die eine *Place Strategy* im ersten Experimentaldurchgang präferierten, zeigten signifikant schlechtere Leistungen im MRT ($M_{Place}=9.04$; $SD=4.40$) als Pbn, die eine *Response Strategy* bevorzugten ($M_{Response}=11.26$; $SD=3.33$) [$t_{59}=2.25$; $p=.015$; $d=.40$].

2.3.6 Ergebniszusammenfassung

Es fanden sich keine Geschlechtsunterschiede bezüglich der Leistung im Virtuellen Labyrinth: Männer und Frauen sind etwa gleich gut im Labyrinth. Im Mentalen Rotationstest (MRT) waren Männer dagegen signifikant besser als Frauen.

Es fand sich ebenso kein Zusammenhang zwischen den Leistungen im Virtuellen Labyrinth und den Sexualhormonen Testosteron und Progesteron. Allenfalls zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Testosteronkonzentration und der Leistung im MRT: Je höher der Testosteronspiegel, desto mehr Punkte wurden im MRT erreicht.

Es lassen sich zwei Navigationsstrategien im Virtuellen Labyrinth differenzieren. Aufgrund des Fehlerverhaltens über die vier Experimentaltrials konnten 21 Pbn einer *Place Strategy* und 26 Pbn einer *Response Strategy* zugeordnet werden. 15 Pbn konnten keiner Strategie eindeutig zugeordnet werden. Anhand allein des ersten Experimentaltrials konnten dagegen alle Pbn eindeutig einer Strategiegruppe zugeordnet werden. Dann präferierten 26 Pbn eine *Place Strategy* und 36 eine *Response Strategy*.

Männer wiesen tendenziell einen etwas niedrigeren Navigationsstrategiekoeffizienten auf, bevorzugten also etwas häufiger als Frauen eine *Response Strategy*. Sie wählten auch im ersten Experimentaltrial etwas häufiger als Frauen eine *Response Strategy*. Dieser Unterschied ist nicht signifikant. Signifikant sind die Unterschiede in der Selbsteinschätzung mittels Fragebogen: Männer gaben in der ASS signifikant häufiger als Frauen an, eine Orientierungsstrategie zu verwenden.

Die Wahl einer Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth wird zum Teil durch Sexualhormone moduliert: Vor allem in der Gruppe der spontanzyklischen Frauen korreliert die Höhe des Navigationsstrategiekoeffizienten deutlich mit der Höhe der Progesteronkonzentration im Speichel. Das bedeutet, dass Frauen eher eine *Place Strategy* wählten, wenn ihr Progesteronspiegel hoch war. Für Testosteron fand sich kein Zusammenhang.

Spontanzyklische Frauen wählten im ersten Experimentaltrial ebenfalls überzufällig häufig eine *Place Strategy*. Ferner hatten Pbn mit einer *Place Strategy* signifikant höhere Progesteronwerte als Pbn mit einer *Response Strategy*. Für Testosteron fand sich kein Zusammenhang. Zusätzlich gaben spontanzyklische Frauen, das heißt Pbn mit den höchsten zu erwartenden Östrogen- und Progesteronwerten, die signifikant geringsten Werte auf der Orientierungsskala der ASS im Vergleich zu den anderen Experimentalgruppen an.

Die im Virtuellen Labyrinth gefundenen Strategien hingen teilweise mit Strategien im Fragebogen zusammen: Pbn mit hohem c_{nav} schätzten sich signifikant

niedriger auf der Skala Orientierungsstrategie ein als Pbn mit niedrigem c_{nav} : Pbn mit *Place Strategy* gaben also seltener an, eine Orientierungsstrategie zu verwenden als Pbn mit einer *Response Strategy*.

Der Grundriss des Labyrinths wurde insgesamt häufiger falsch wiedergegeben als richtig. Dabei unterschieden sich die drei Experimentalgruppen und die Geschlechter nicht. Es lässt sich aber feststellen, dass Pbn, die eine *Response Strategy* bevorzugten den Grundriss häufiger richtig wiedergeben als Pbn, die eine *Place Strategy* bevorzugten.

Ferner waren Pbn, die zumindest im ersten Experimentaltrial eine *Response Strategy* bevorzugten signifikant besser im MRT als Pbn mit einer *Place Strategy*.

2.4 Diskussion

Ein wichtiges Ziel dieser Studie war die verhaltensexperimentelle Trennung zweier unabhängiger Navigationsstrategien im Labyrinth beim Menschen. Dies kann im Wesentlichen als geglückt bezeichnet werden.

Es ist möglich Zuordnungen zu machen, sowohl anhand des hier eingeführten Navigationsstrategiekoeffizienten c_{nav} , als auch anhand der spontan im ersten Experimentaldurchgang gewählten Strategie: Konkret kann eine *Place Strategy* von einer *Response Strategy* abgegrenzt werden (vgl. Abschnitt 1.3.3). Dabei ist eine *Place Strategy* eine Strategie, bei der sich an externen Landmarken orientiert wird, eine *Response Strategy* eine, in der der Pb sich von diesen unabhängig innerhalb des Labyrinths orientiert.

Es wurden bis hierher die Begrifflichkeiten verwendet, die Korol (z.B. 2004) in ihren Arbeiten einführt, und die auch von anderen Autoren (z.B. Schmitzer-Torbert, 2007; Quinlan et al., 2008; Levy et al., 2005) so verwendet werden: *Place Strategy* und *Response Strategy*. Diese werden oft mit anderen Strategiebegriffen verglichen. Korol und zum Beispiel auch Schmitzer-Torbert (2007) setzen die *Place Strategy* etwa mit einer allozentrischen, die *Response Strategy* mit einer egozentrischen Strategie gleich.

Das erscheint erst einmal auch einleuchtend: Die *Response Strategy* entspricht offensichtlich dem Nachlaufen einer Route, was einer egozentrischen, motorischen Strategie gleich käme (daher auch der Begriff *Response*), während man das Ziel bei der *Place Strategy* von der eigenen Person unabhängig, orientiert an objektiven äußeren Referenzpunkten repräsentiert, das heißt allozentrisch enkodiert.

Andere Autoren setzen eine *Response Strategy* mit einer nicht-räumlichen, die *Place Strategy* mit einer räumlichen Strategie gleich (Iaria et al., 2003; Etchamendy & Bohbot, 2007), was der Unterteilung in egozentrische und allozentrische Strategie ähnelt, da zum

Beispiel allozentrisch in der Regel als die objektiv-räumliche Repräsentationsart begriffen wird, die vom Standpunkt der eigenen Person unabhängig ist.

Bei genauerer Betrachtung der bisherigen Studien und der aktuellen Untersuchung treten einmal mehr einige Widersprüchlichkeiten in Bezug auf solche Gleichsetzungen auf. Wenn Korol et al. etwa die *Place Strategy* mit einer allozentrischen Navigationsstrategie gleich setzen, dann muss es erstaunen, dass weibliche Ratten mit besonders hohen weiblichen Hormonkonzentrationen die „männliche“ allozentrische Strategie, das heißt *Place Strategy* nutzen, während bei niedriger Konzentration die „weibliche“ egozentrische Strategie gewählt wird (Korol et al., 2004). Ebenso ist es dann relativ unklar, warum in der hier vorgestellten Studie etwas mehr Frauen die vermeintlich männliche allozentrische, räumliche *Place Strategy* wählten, jedoch etwas mehr Männer eine *Response Strategy*. In der Literatur wird jedoch gegenteiliges berichtet: nämlich, dass Männer eher allozentrische, Frauen dagegen eher egozentrische Strategien bevorzugen (Bever, 1992; Maguire et al., 1999; Dabbs et al., 1998; Saucier et al., 2002).

Hinzu kommt, dass in der vorliegenden Studie ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen der Höhe des Navigationsstrategiekoeffizienten c_{nav} und den Punktwerten auf der Skala *Orientierungsstrategie* der Alltags-Strategie-Skala gefunden wurde. Das heißt, je höher die Einschätzung auf der Skala *Orientierungsstrategie* (im Gegensatz zu *Routenstrategie*), desto niedriger c_{nav} , das heißt desto eher wurde eine *Response Strategy* gewählt. Dies ist nicht konsistent mit der Vorstellung, dass die *Response Strategy* die nicht-räumliche, egozentrische Strategie darstellt, da die *Orientierungsstrategie* wiederum als flexible, allozentrische Strategie gilt.

Ein weiterer, vielleicht der deutlichste Hinweis dafür, dass *Response Strategy* und *Place Strategy* bisher oft falsch interpretiert worden sind ist, dass *Response* Lerner anschließend signifikant häufiger den Grundriss des Labyrinths richtig wiedergeben konnten. Das bedeutet, dass eher die *Response* Lerner, nicht aber die *Place* Lerner ein Überblickswissen erworben und eine kognitive Landkarte erstellt haben. Letzteres wird mit einer allozentrischen und vor allem räumlichen Repräsentation in Zusammenhang gebracht. In diesem Zusammenhang ist auch noch interessant, dass Pbn mit einer *Response Strategy* signifikant besser im Mentalen Rotationstest waren, obwohl diese Strategie doch als eine Strategie angesehen wird, die wenig räumliches Verständnis voraussetzt (z.B. Iaria et al., 2003; Etchamendy & Bohbot, 2007).

All dies stellt die Interpretation von zum Beispiel Etchamendy und Bohbot (2007), Iaria et al. (2003), Korol (2004) oder Levy et al. (2005) empirisch in Frage. Es ist aber auch theoretisch durchaus plausibel, dass die *Response Strategy* einer räumlichen

Strategie gleichkommt, während die *Place Strategy* vielleicht eher mit einer deutlich unflexiblen Landmarkenstrategie gleichzusetzen ist. Wenn einem Pb mit einer *Response Strategy* zum Erlernen eines Weges in einem an allen Ecken ansonsten gleich aussehenden Labyrinth nur geometrische Informationen zur Verfügung stehen, ist er nahezu gezwungen eine kognitive Karte des Labyrinths aufzubauen, da er die externen Landmarken offenbar nicht zur Orientierung nutzt. Durch das gezielte Ablaufen des Labyrinths nach euklidischen Regeln und des Gewährwerdens des Heimkehrvektors könnte sich der *Response* Lerner somit ein metrisches, ein Orientierungswissen aufbauen. Er lernt schließlich zu Beginn keine feste Route, sondern muss durch freie Exploration den Weg finden und dies zum Beispiel durch die komplexen Prozesse der Koppelnavigation und Pfadintegration. Dies wird zwar zuweilen auch als ein egozentrisches Vorgehen interpretiert (Newcombe, 2002), ist aber sicher nicht als nicht-räumlich zu betrachten, da gerade dieses Vorgehen ein tiefes Verständnis räumlicher Relationen generieren dürfte.

Der *Place* Lerner könnte sich demgegenüber einfach nur die Landmarke merken, muss zu Beginn eine kurze perzeptuell gesteuerte Orientierung vornehmen, wo sich die fragliche Landmarke von ihm aus gesehen befindet (egozentrisch) und diese dann lediglich ansteuern. Eine kognitive Karte oder Orientierungswissen ist für ihn nicht notwendig. Die *Place Strategy* kann dann auf einem nicht-räumlichen Vorgehen beruhen, wenn man die so genannte Wegleitung (*guidance*) als Basis einer solchen Strategie annimmt, bei der keine eigentlich metrische Vorstellung generiert, sondern lediglich die das Ziel markierende Landmarke erinnert wird.

Aufgrund dieser Ausführungen möchte ich die Begriffe von Korol nicht weiter verwenden, da diese aufgrund ihrer sehr oft im Zusammenhang mit egozentrischer und allozentrischer Strategie verwendeten Bedeutungszuweisung zu Konfusionen führen. Stattdessen möchte ich zwei neue Begriffe einführen, die interpretatorisch noch nicht überbelastet sind und dennoch die beiden möglichen Strategien im Labyrinth gut beschreiben: Im Folgenden werde ich die beiden im Labyrinth möglichen Strategien als *external* und *internal* beschreiben. Damit ist gemeint, dass für eine externale Strategie die externen Reize, die Landmarken zur Orientierung genutzt werden, unabhängig von einem theoretisch zugrunde gelegten Referenzsystem: Dies entspricht der *Place Strategy*. Bei der internalen Strategie sind zwei Interpretationen des Verhaltens möglich: Zum einen ist es denkbar, dass die Pbn eine mentale, eben interne Repräsentation aufbauen. Aber auch wenn sie dies nicht tun sollten, so orientieren sie sich ganz offensichtlich doch auf jeden Fall an Reizen *innerhalb* des Labyrinths. So oder so ist der Begriff der

internalen Strategie angebracht, was einer *Response Strategy* entspräche. Es deutet nun einiges darauf hin, dass die externale Strategie die unflexiblere ist, die eher einer Landmarken- oder Wegleitestrategie entspricht, während die internale Strategie Überblickswissen generiert, was eher einer allozentrischen Strategie entspräche. Korol und andere sind da anderer Ansicht. Aufgrund der Daten der vorliegenden Studie lässt sich diese Frage nicht umfassend klären. Die Daten geben allenfalls Hinweise darauf, dass die beiden Strategien bisher vorschnell in einer bestimmten Art interpretiert wurden, die nicht ganz den empirischen Gegebenheiten entspricht. Darum wurde dieser Frage in einer weiteren Studie (vgl. Abschnitt 4) genauer nachgegangen.

Als problematisch hat sich bei der Differenzierung der Strategien allenfalls erwiesen, dass aufgrund von offensichtlichen Misserfolgserlebnissen (in den für die eigene Strategie ungeeigneten Bedingungen) etwa ein Viertel der Pbn (15) ihre Strategie im Verlaufe des Experiments veränderten. Dadurch wurde eine sichere Zuordnung spontan bevorzugter Strategien erschwert. In der Nachfolgeuntersuchung (vgl. Abschnitt 3.2) wird dies berücksichtigt.

Neben der Strategiedifferenzierung und –spezifizierung waren weitere Ziele dieser Studie, den Einfluss von Sexualhormonen und Geschlecht auf die Strategiewahl und räumliche Leistungen zu untersuchen. Als Leistungsparameter im Virtuellen Labyrinth wurden die Fehler im letzten Durchgang der Kontrollbedingung, sowie die Durchlaufdauer in dieser erhoben. Zusätzlich wurde untersucht, wie gut der Grundriss des Labyrinths im Anschluss an alle sechs Trials wiedergegeben werden konnte. In allen drei Parametern ließen sich keine Leistungsunterschiede zwischen Männern und Frauen oder zwischen den drei Experimentalgruppen feststellen (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Es werden in der Literatur Leistungsunterschiede zwischen Männern und Frauen in räumlichen Orientierungs- oder Navigationsaufgaben dahingehend beschrieben, dass Männer bessere Leistungen erbringen. Dies ist aber bei weitem nicht so konsistent wie in anderen räumlichen Aufgaben (vgl. Coluccia & Louse, 2004). Darum muss das hier gefundene Ergebnis nicht allzu sehr verwundern, da es sich bei dem Virtuellen Labyrinth um ein recht einfaches Labyrinth handelt, in dem die Anzahl der Fehler insgesamt recht gering ist. Dies war bei der Planung des Experiments durchaus beabsichtigt, da es primär um die Strategiedifferenzierung und weniger um Leistungsmessung ging. Ein zu schwieriges Labyrinth hätte eine Zuteilung zu einer der beiden Strategien anhand der Fehler in bestimmten Bedingungen erschwert, da die Kontrollbedingung in ihrer Schwierigkeit den Experimentalbedingungen entsprechen sollte und viele Fehler in

beiden Experimentalbedingungen wie auch der Kontrollbedingung eine Zuordnung zu einer der beiden Strategien unmöglich gemacht hätte.

Ein interessanter Aspekt bezüglich der Leistungen im Virtuellen Labyrinth trotz der Einfachheit der Aufgabe ist ein negativer Zusammenhang zwischen dem Testosteronlevel und der Zeit, die für das Durchlaufen des Labyrinths im Kontrolldurchgang benötigt wurde, vor allem innerhalb der Gruppe der Männer. Das heißt, dass die Männer umso langsamer durch das Labyrinth liefen, desto niedriger ihr Testosteronspiegel im Speichel war. Schon andere Studien zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen der Höhe des Testosteronspiegels und Leistungen in räumlichen Aufgaben allgemein (z.B. Aleman et al., 2004; Hooven et al., 2004) und für räumliche Navigation im Speziellen (Burkitt et al., 2007; Driscoll et al., 2005). Dazu passt auch, dass sich in der vorliegenden Studie ebenfalls ein positiver Zusammenhang zwischen Höhe des Testosteronspiegels und den Punktwerten im Mentalen Rotationstest (MRT) findet. Somit kann die vorliegende Studie die Ergebnisse anderer Studien bestätigen.

Ebenfalls konsistent mit den Ergebnissen anderer Studien (z.B. Peters et al., 2006; Voyer et al., 1995; Voyer & Saunders, 2004) ist, dass sich Männer und Frauen sehr deutlich in ihren Leistungen im MRT unterscheiden. Es wird oft behauptet, dass der MRT ein guter Indikator für räumliche Fähigkeiten allgemein darstellt, da er mit diesen eng verknüpft sei. Wäre dem so, so müsste es erstaunen, dass Männer zwar deutlich besser im MRT, nicht aber im Labyrinth sind und die Leistungen im Virtuellen Labyrinth mit denen im MRT überhaupt nicht zusammenhängen. Räumliche Orientierung gehört aber zu den wichtigsten Faktoren räumlicher Fähigkeiten (vgl. z.B. Newcombe, 2002; Thurstone, 1938; Maier, 1999; Allen, 1999) und es darf deshalb bezweifelt werden, dass der MRT, der streng genommen nur eine Teilkomponente von Raumkognition widerspiegelt, ein Test zur allgemeinen Raumvorstellungsfähigkeit ist.

Männer und Frauen unterschieden sich nicht in ihrer bevorzugten Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth, zumindest nicht fundamental. Es konnte lediglich eine gewisse Tendenz dahingehend beobachtet werden, dass Frauen etwas häufiger eine externale, das heißt *Place Strategy*, Männer etwas häufiger eine internale, das heißt *Response Strategy* präferierten. Dies ist konsistent mit der Studie von Levy und Kollegen (2005), die bei ähnlicher Operationalisierung der Strategien ebenfalls kaum Unterschiede in der Strategiepräferenz finden konnten. Lediglich im ersten Durchgang bevorzugten Männer häufiger als Frauen eine internale Strategie. Im Fragebogen zur alltäglichen Strategie, der Alltags-Strategie-Skala (ASS), unterschieden sie sich

demgegenüber auf der Skala Orientierungsstrategie: Männer schätzten sich auf dieser deutlich höher ein als Frauen. Das bedeutet, Männer gaben an, sich öfter an Richtungen und euklidischen Informationen zu orientieren. Das ist wiederum konsistent mit anderen Studien zu räumlichen Navigationsstrategien mittels Fragebogen (z.B. Lawton & Kallai, 2002).

Es ist ein interessanter Aspekt, dass Studien immer wieder Geschlechtsunterschiede in der Strategiepräferenz und –nutzung finden (vgl. Abschnitt 1.4.3), wenn die Strategien über Fragebögen und subjektive Beschreibungen operationalisiert werden, offenbar aber nicht, wenn die Strategien verhaltensexperimentell erhoben werden (z.B. Levy et al., 2005). Möglicherweise ist dies auf Geschlechtsstereotype und Erwartungen bezüglich räumlicher Orientierung zurück zu führen. In diesem Zusammenhang gibt es einige Studien, die den Zusammenhang von räumlicher Orientierung, räumlichen Navigationsstrategien und räumlicher Ängstlichkeit untersuchten. Dabei zeigte sich, dass Frauen eine höhere Angst vor räumlichen Orientierungssituationen und –aufgaben haben als Männer, die wiederum ein deutlich höheres räumliches Selbstbewusstsein aufweisen (Lawton, 1994). Da Selbsteinschätzungen wie in den verwendeten Fragebögen durch solche Faktoren wie Einstellung und Erwartungen durchaus beeinflusst werden können, wäre es denkbar, dass die Frauen gar nicht unbedingt nicht-räumliche, „schlechtere“ egozentrische Navigationsstrategien verwenden, sondern dies nur ihren eigenen, dem weiblichen Stereotyp entsprechenden Erwartungen entspricht. Studien zeigen zum Beispiel, dass sich die Leistung in räumlichen Aufgaben bei Frauen signifikant verschlechtert, wenn sie wissen, dass es sich um einen Test zum räumlichen Denken handelt oder wenn vorher Geschlechtsstereotypen aktiviert wurden (Hausmann, Schoofs, Rosenthal, & Jordan, in review; Wraga, Duncan, Jacobs, Helt, & Church, 2006). Wenn sich die Leistung von derlei Stereotypen beeinflussen lässt, dann dürfte dies für Selbsteinschätzungen erst recht gelten. Dies kann aber im Rahmen dieser Studie allenfalls Spekulation bleiben, zumal sich zwischen den drei untersuchten Gruppen doch gewisse Unterschiede fanden:

Innerhalb der drei Experimentalgruppen zeigte sich, dass spontanzyklische Frauen tendenziell eher dazu neigten eine externale Navigationsstrategie zu wählen, Männer dagegen eher eine internale. Frauen, die mit hormonellen Kontrazeptiva verhüten, zeigten eine erwartungsgemäße Verteilung auf beide Strategiegruppen, so dass man ihnen keine bestimmte Präferenz unterstellen kann. Zusätzlich dazu zeigte sich, dass der Navigationsstrategiekoeffizient c_{nav} signifikant mit der Höhe des Progesteronspiegels bei spontanzyklischen Frauen korrelierte, das heißt je höher die

Progesteronkonzentration, desto wahrscheinlicher wählten die Pbn eine externale Strategie. Obwohl Korol et al. (2004) nur Zusammenhänge zum Östrogen berichten, sind beide Ergebnisse mit denen von Korol konsistent. Es zeigte sich wie bei Korol und Kollegen in dieser Studie, dass weibliche Sexualhormone die Wahl einer externalen Navigationsstrategie begünstigen. Eine vorsichtige Interpretation des Einflusses von Östrogen allein auf der Basis der Zyklusphase der spontanzyklischen Frauen lässt vermuten, dass Östrogen ebenso wie Progesteron die Wahl einer externalen Strategie begünstigt.

Direkt konnte das Östrogen in dieser Studie jedoch nicht analysiert werden: Die Bestimmung der Sexualhormone über die Speichelproben war nur bedingt erfolgreich. Zum Einen scheinen die Werte, vor allem der weiblichen Sexualhormone relativ abhängig davon, was der Pb zuvor gegessen hat und wie gründlich er sich den Mund zuvor ausgespült hat.

Die Werte für Östrogen, die durch die Kits der Firma IBL ermittelt wurden, waren hochgradig unplausibel: Männer hätten demnach genauso viel Östrogen im Speichel wie Frauen. Dadurch konnte man sich aber auch nicht auf die Genauigkeit der Messung bei den Frauen verlassen und die Östrogenwerte konnten nicht mit in die weitere Analyse einbezogen werden. Dies ist deswegen unglücklich, da gerade Östrogen in vorherigen tierexperimentellen Untersuchungen (Quinlan et al., 2008; Korol et al., 2004; Korol, 2004) die Strategiewahl deutlich zu beeinflussen schien. Auch die Leistung in räumlichen Orientierungsaufgaben wird durch Östrogen beeinflusst (vgl. z.B. Galea et al., 1995; Snihur et al., 2008; Rissanen et al., 1999). Dies entzieht sich nun einer empirischen Überprüfung im Rahmen dieser Studie.

Insgesamt konnte aber gezeigt werden, dass Sexualhormone einen Einfluss auf die Wahl einer bestimmten Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth haben und zumindest teilweise auf die Leistung im Virtuellen Labyrinth, sowie im mentalen Rotationstest (MRT). Letzterer ist ein typisches Beispiel dafür, dass Männer in räumlichen Aufgaben bessere Leistungen erbringen als Frauen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass dieser Leistungsunterschied womöglich nicht allein auf das männliche Geschlecht als solches zurückgeht, sondern durch aktivierende Einflüsse von Sexualhormonen bedingt sein kann. Ferner deutet sich an, dass Männer und (spontanzyklische) Frauen unterschiedliche Strategien verwenden, die wiederum durch Sexualhormone moduliert werden. Das deutet darauf hin, dass vermutlich Männer und Frauen nicht per se unterschiedliche Leistungen in räumlichen Aufgaben erbringen,

sondern unterschiedliche Strategien verwenden, die wiederum durch ihren Hormonstatus moduliert werden.

Für weiterführende Untersuchungen sind folgende Punkte zu beachten: Zum einen ist die Bestimmung der Sexualhormone über den Speichel nicht verlässlich genug um wirklich umfassende Aussagen über diese und ihren Einfluss auf kognitive Leistungen und Strategien machen zu können (vgl. auch Brandhorst et al., 2008). Daher wird in der Folgeuntersuchung zusätzlich auf Blutproben zurück gegriffen. Ferner führen die Misserfolgserlebnisse in denjenigen Bedingungen, in denen die von den Pbn spontan präferierten Strategien nicht zum Erfolg führen dazu, dass einige Pbn ihre Navigationsstrategie im Laufe der Untersuchung veränderten, so dass sie nicht eindeutig einer bestimmten Strategie zuzuordnen waren. Aus diesem Grund wird in der Folgeuntersuchung ein solcher Misserfolg dadurch unterbunden, dass beide Strategien in allen Bedingungen erfolgreich sind (vgl. Abschnitt 3.2.4.1).

3. Studie 2: Neuronales Korrelat räumlicher Navigationsstrategien

3.1 Einführung

Es ist ein Ziel dieser Arbeit, die Beschaffenheit räumlicher Navigationsstrategien näher zu betrachten als dies in bisherigen empirischen Arbeiten gemacht wurde, auch um berichtete und in Ansätzen in der ersten Studie auch gefundene Geschlechtsunterschiede in der Strategiepräferenz besser interpretieren zu können. In der ersten Studie deutete sich an, dass die beiden verhaltensexperimentell trennbaren Navigationsstrategien in anderen Arbeiten einer nicht ganz korrekten Interpretation unterlagen. Um die Beschaffenheit der beiden Strategien genauer zu untersuchen, sollten die Pbn in dieser zweiten Studie mehr als nur einen Strategiefragebogen ausfüllen. Dies wurde zunächst eher explorativ betrachtet.

Die Analyse neuronaler Aktivierungen in Abhängigkeit der präferierten Navigationsstrategie, aber auch des Geschlechts verspricht ebenfalls Einblicke in der Frage der inhaltlichen Beschaffenheit räumlicher Navigationsstrategien. Es ist ein weiteres Ziel dieser Studie neben der Überprüfung, ob für Navigation typische Hirnareale eine Aktivierung aufweisen, wenn Pbn durch das Virtuelle Labyrinth laufen, ob bei Männern und Frauen unterschiedliche neuronale Netzwerke aktiviert werden. Grön und Kollegen (2000) hatten unterschiedliche Aktivierungen bei Männern und Frauen gefunden, ebenso Schadow et al. (2004). Die Frage, der nun nachgegangen wurde ist, ob diese Unterschiede sich einerseits replizieren lassen und andererseits, ob diese Unterschiede tatsächlich ein reiner Geschlechtseffekt sind oder ob diese Unterschiede nicht vielmehr mit unterschiedlichen Strategien beim Lösen einer Navigationsaufgabe zu erklären sind. Wie bereits erläutert, sollen Männer und Frauen unterschiedliche Navigationsstrategien präferieren. Männer sollen etwa sowohl euklidische als auch Landmarkeninformationen nutzen, Frauen hingegen primär Landmarken (Sandstrom et al., 1998; Galea & Kimura, 1993). Ferner sollen Männer eher allozentrische Strategien und Überblickswissen nutzen, Frauen hingegen eher egozentrische und Routenstrategien (Maguire et al., 1999; Saucier et al., 2002). Es ist plausibel, dass diese unterschiedlichen Strategien auch unterschiedliche neuronale Netze ansprechen. Wenn die unterschiedlichen Aktivierungen in Abhängigkeit von der verwendeten Strategie mit denen in Abhängigkeit vom Geschlecht vergleichbar sind, dann ist dies ein Hinweis dafür, dass Männer und Frauen tatsächlich unterschiedliche Strategien bevorzugen. Dies soll in der vorliegenden Studie mittels des modifizierten Virtuellen Labyrinths der ersten

Studie untersucht werden. Da Sexualhormone nachweislich im ZNS wirken, ist ferner davon auszugehen, dass diese die neuronalen Aktivierungsmuster beeinflussen.

Hypothesenherleitung

Die Ergebnisse der Studie 1 zeigten keine Leistungsunterschiede zwischen Männern und Frauen im Virtuellen Labyrinth.

Hypothese 1: Männer und Frauen unterscheiden sich nicht in ihren Leistungen im Virtuellen Labyrinth.

Es werden für räumliche Navigation verschiedene neuronale Aktivierungsmuster beschrieben. Unter anderem werden neben den Kernregionen (rechter) Hippocampus und Parietallappen (vor allem inferior, aber auch medial und superior), auch motorische Areale, die Basalganglien, vor allem der Nucleus caudatus, parahippocampale Regionen (unter anderem auch der enthorinale Cortex), das (posteriore) Cingulum, der präfrontale Cortex (vor allem Area 9 und 46), zum Teil auch Gyrus occipitalis medius, sowie hOC5 beschrieben (vgl. Abschnitt 1.6.1).

Hypothese 2: Es wird erwartet, dass neuronale Areale während der Navigation aktiviert werden, gemessen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI), die für diese bereits beschrieben sind.

Männer und Frauen nutzen unterschiedliche Navigationsstrategien (z.B. Maguire et al., 1999; Saucier et al., 2002). Auch in der ersten Studie ließ sich eine Tendenz für eine unterschiedliche Strategiewahl aufzeigen, insofern als dass Männer etwas häufiger eine interne, Frauen etwas häufiger eine externe Strategie präferierten.

Hypothese 3: Männer wählen häufiger als (spontanzyklische) Frauen eine interne Navigationsstrategie, Frauen häufiger eine externe.

Grön et al. (2001) berichten bei Männern eine stärkere Aktivierung des linken Hippocampus, bei Frauen demgegenüber eine stärkere Aktivierung des rechten Parietallappens und präfrontaler Strukturen.

Hypothese 5: Männer und Frauen zeigen unterschiedliche neuronale Aktivierungsmuster.

Es wurden bereits unterschiedliche neuronale Aktivierungsmuster in anderen Studien in Abhängigkeit von den präferierten Strategien in räumlichen Aufgaben gefunden (z.B. Jordan et al., 2004). Konkret zeigt sich für eine interne Navigationsstrategie vor allem

eine stärkere Aktivierung des Nucleus caudatus und für eine externale Strategie eine des Hippocampus (Iaria et al., 2003; Hartley et al., 2003b).

Hypothese 6: Unterschiedliche Strategien führen zu unterschiedlichen neuronalen Aktivierungen, gemessen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI). Die externale Strategie führt voraussichtlich zu einer stärkeren Hippocampusaktivierung, die internale Strategie führt zu einer stärkeren Beteiligung des Nucleus caudatus.

Sexualhormone wirken im ZNS (vgl. Abschnitt 1.5.1.3). Darum ist es plausibel, dass diese die neuronalen Aktivierungsmuster während räumlicher Navigation modulieren.

Hypothese 7: Progesteron und Östrogen beeinflussen die neuronalen Aktivierungen während räumlicher Navigation im Virtuellen Labyrinth.

Hypothese 8: Testosteron beeinflusst die neuronalen Aktivierungen während räumlicher Navigation im Virtuellen Labyrinth.

3.2 Methode

3.2.1 Probandinnen und Probanden

Es wurden 22 gesunde, rechtshändige normalsichtige (teilweise mit korrigiertem Visus) Studierende der Humanmedizin getestet, deren durchschnittliches Alter 23 Jahre betrug (Range: 21–27). Es wurde mittels des ANNETT-Händigkeitsfragebogen die Rechtshändigkeit aller Pbn abgesichert (Annett, 1970). Es wurden 11 Männer (durchschnittliches Alter 22,8) und 11 Frauen (durchschnittliches Alter 23,3) untersucht. Die Frauen nahmen alle keine hormonellen Kontrazeptiva ein und berichteten einen regelmäßigen Menstruationszyklus (im Durchschnitt 27,64 Tage). Um einen möglichst großen Unterschied in den Konzentrationen der Sexualhormone zwischen Männern und Frauen zu erreichen, wurden die beteiligten Frauen am Tag 19-23 ihres Zyklus mit hohen Konzentrationen an Progesteron und Östradiol getestet. Dieser Zeitpunkt entspricht in der Regel der Lutealphase (vgl. Abschnitt 1.5.1.2).

3.2.2 Versuchsablauf

Die Untersuchung unterteilte sich in zwei Teile, die auch an zwei unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden: ein Vorgespräch und die Untersuchung im Magnetresonanztomographen. Beide Teile wurden in ihrem Ablauf von der

Ethikkommission der humanmedizinischen Fakultät der Universität Göttingen (Anhang A) genehmigt.

Zunächst erschienen die Pbn zu einem etwa halbstündigen Vorgespräch, bei dem sie über den Versuchsablauf der eigentlichen fMRI-Untersuchung unterrichtet, sowie über mögliche Gefahren aufgeklärt wurden. Dass sie dies verstanden hatten und bereit waren an der Untersuchung teilzunehmen, bestätigten die Pbn mit ihrer Unterschrift (Anhang H).

Daraufhin füllten sie den ANETT Handedness Questionnaire aus (Annett, 1995; Annett, 1970). Weiterhin wurden sie über den Ablauf der fMRI-Untersuchung informiert und durchliefen zu Übungszwecken einen Labyrinthdurchgang. In der Regel erschienen die Pbn dann am nächsten Tag zur eigentlichen fMRI-Messung.

Vor der Messung wurden ihnen eine Speichel-, sowie eine Blutprobe entnommen. Anschließend wurden sie in den Tomographen geschoben. Vorher wurden ihnen die LCD-Brille, sowie Kopfhörer aufgesetzt (vgl. Abschnitt 3.2.3.2). Wie im Vorexperiment war die Navigation im Labyrinth mit einem Joystick möglich (vgl. Abschnitt 3.2.3.2). Dieser wurde zunächst kalibriert, wodurch die Pbn auch gleich den Umgang mit dem Joystick üben konnten.

Zunächst wurde der so genannte Localizer gemessen, mittels dem man die Orientierung und Ausrichtung des individuellen Kopfes bestimmt, sowie die anatomischen Aufnahmen vorgenommen. Anschließend machten die Pbn einen verbalen Gedächtnistest, der Teil einer anderen Untersuchung war. Erst dann wurde die Brille eingeschaltet und die Pbn durchliefen das erste Labyrinth, das pseudorandomisiert ausgewählt wurde. Jedes Labyrinth bestand aus fünf Durchgängen (vgl. Abb. 17 in Abschnitt 3.2.4.1). Jeder Pb durchlief vier solcher Labyrinth mit jeweils fünf Durchgängen.

Nach der Messung füllten sie die Navigationsstrategiefragebögen (vgl. Abschnitt 3.2.4.2) aus, während ihnen erneut Blut und Speichel entnommen wurde. Insgesamt dauerte die Untersuchung etwa 1,5 Zeitstunden.

3.2.3 Funktionelle Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRI¹³), ist ein verhältnismäßig junges, nicht-invasives bildgebendes Diagnostikverfahren zur kontraststarken Darstellung von Gewebe- und Organstrukturen. Die Grundlage stellen ein starkes Magnetfeld, sowie hochfrequente Radiowellen dar.

Man macht sich zur Bildgebung anatomischer Strukturen die magnetischen Eigenschaften der Wasserstoffatome in menschlichem Gewebe zunutze. Diese werden unter der Wirkung eines äußeren Magnetfeldes im Körper in einer bestimmten Weise ausgerichtet, um sie dann mittels hochfrequenter Radiowellen (RF-Puls) in Resonanz zu bringen. Im Moment des Ausschaltens der Radiowellen kehren die Atome wieder in die stabile Ausgangslage zurück und geben dabei einen Teil der elektromagnetischen Energie ab, die sie vorher durch den RF-Puls aufgenommen haben. Diese Energie kann mit Hilfe einer Empfangsspule gemessen werden. Dabei hängt die Dauer, die die Wasserstoffatome benötigen, um wieder in ihren Ausgangszustand zurückzukehren, von dem Gewebe ab, in dem sie sich befinden. Daher kann man anhand der benötigten so genannten Relaxations-Zeit Rückschlüsse auf das Gewebe machen, das sich an einem bestimmten Ort befindet (vgl. Anhang I).

Zusätzlich zu den Möglichkeiten solch differenzierter struktureller Messungen vermag man mittels dieser Technik seit Anfang der 1990er Jahre auch differenzierte funktionelle Messungen zu machen, das heißt neuronale Aktivität indirekt zu messen. Man macht sich hierbei die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von sauerstoffarmem und sauerstoffreichem Blut zunutze. Da man weiß, dass es bei Erregung von Cortexarealen zu einer Steigerung der kortikalen Stoffwechselrate kommt, lässt sich aufgrund vermehrten Flusses sauerstoffreichen Blutes (BOLD-Effekt) eine Aussage bezüglich der neuronalen Aktivierung in dem betreffenden Bereich machen: Das aktivierte Areal reagiert mit einem erhöhten regionalen zerebralen Blutfluss (rCBF). Diese soeben grob umrissenen Prinzipien werden in Anhang I ausführlich beschrieben.

3.2.3.1 Aufnahmegerät und –parameter

Bei dem in dieser Studie verwendeten Magnetresonanztomographen handelt es sich um das Gerät Siemens Magnetom Trio (Erlangen, Deutschland), das seinen Standort im Universitätsklinikum Göttingen hat. Das Magnetfeld dieses Geräts wird von einem supraleitenden Magneten erzeugt und weist eine magnetische Flussdichte von 3 Tesla

¹³ von *magnetic resonance imaging*

auf. Die Untersuchungen wurden mit freundlicher Unterstützung der Forschungsgruppe „MR-Forschung“ unter der Leitung von Dr. Peter Dechent in der Universitätsmedizin Göttingen durchgeführt. Die in der vorliegenden Studie verwendeten Aufnahmeparameter sind Tab.13 zu entnehmen.

Tab.13: Aufnahmeparameter der anatomischen und funktionellen Messung in der vorliegenden Studie

Aufnahme	Wichtung	Aufnahmeparameter	Schnitt
anatomisch	T1	Voxel: 1 x 1 x 1 Schichten = 176 Schichtdicke: 1 mm FOV (field of view) = 256 mm Kipp-Winkel = 30° Echozeit (TE) = 2,6 ms Wiederholungszeit (TR) = 2250 ms	Sagittal
funktionell	T2* (EPI- Sequenz)	Voxel: 2 x 2 x 4 mm Schichten = 22 Schichtdicke: 4 mm Schichtlücke (Gap): 1 mm FOV (field of view) = 256 mm Kipp-Winkel = 70° Echozeit (TE) = 36 ms Wiederholungszeit (TR)=2000 ms	Oblique

¹Echo Planar Imaging= EPI-Sequenzen sind die schnellsten MR-Sequenzen, die eine sehr hohe Auflösung in kurzer Zeit erreichen. Sie gehen aber auch mit methodischen Problemen einher, was ihren Einsatz in klinischen Kontexten fragwürdig macht Für funktionelle Messungen im experimentellen Kontext, die auf die schnelle Erfassung einer neuronalen Reaktion auf einen bestimmten Stimulus abzielen, stellen sie aber die beste Lösung dar.

3.2.3.4 MR-Zusatzmaterialien

Um experimentalpsychologische Untersuchungen im Magnetresonanztomographen durchführen zu können, benötigt man spezielle Zusatzmaterialien, da man zum Beispiel nicht mit einem normalen Joystick in das Magnetfeld gehen kann. Dessen Leistungsfähigkeit würde eingeschränkt und außerdem könnten die darin enthaltenen Metalle in das Gerät gezogen werden. Es bedarf somit eines MR-tauglichen Joysticks. In der vorliegenden Studie wurde ein Joystick der Fa. Current Designs¹⁴ in Philadelphia verwendet.

Zur visuellen Stimulation wurde eine MR-kompatible LCD-Brille mit zwei direkt vor den Augen liegenden Displays der Fa. Resonance Technology¹⁵ in Northridge eingesetzt. Die zwei Displays fusionieren optisch miteinander, so dass der Pb das Gefühl hat, auf einen einzigen Computerbildschirm zu schauen.

¹⁴ <http://www.curdes.com>

¹⁵ <http://www.mrvideo.com>

3.2.4 Materialien

3.2.4.1 Virtuelles Labyrinth

Es handelt sich um das nahezu gleiche Virtuelle Labyrinth, das auch schon in Studie 1 verwendet wurde (vgl. Abschnitt 2.2.3.2), es wurde jedoch etwas modifiziert.

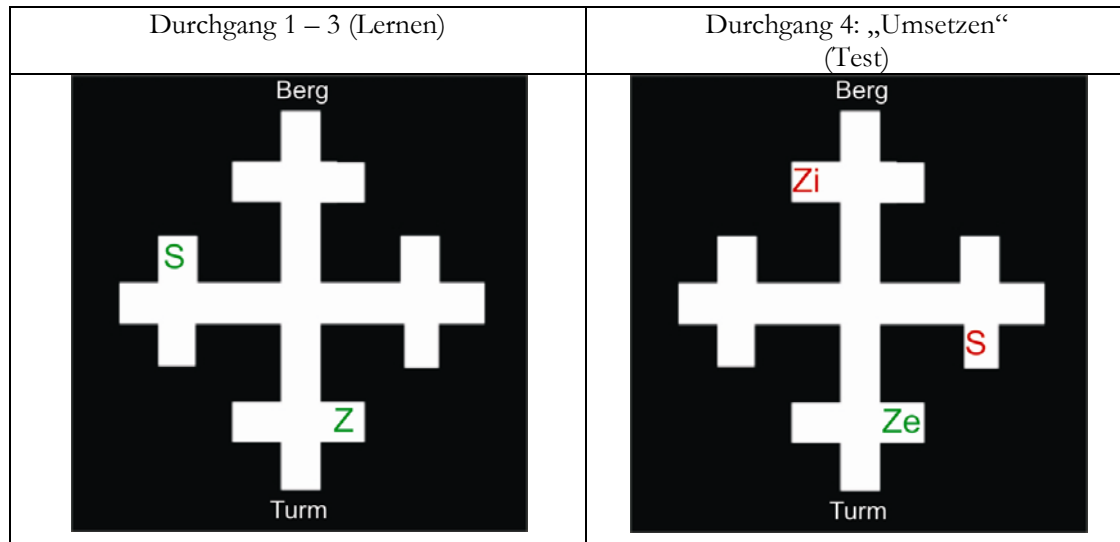


Abb. 16: Schematischer Aufbau der Labyrinthdurchgänge. Links: Aufbau während Lerndurchgängen, S=Startposition, Z=Ziel. Rechts: Aufbau während eines Testdurchgangs, Startposition (S) ist nun verändert. Zielposition für externale Strategie (Ze) bleibt gleich zu den Lerndurchgängen („links vom Turm“), Zielposition für internale Strategie (Zi) ist nun verändert. Pbn, die zu Ze laufen werden einer externalen Strategie zugeordnet, Pbn, die zu Zi laufen einer internalen. Pbn, die eine völlig andere Tür ansteuern, haben möglicherweise keine oder eine andere Strategie verwendet.

Jeder Labyrinth-Trial bestand aus fünf Durchgängen: drei Lerndurchgängen, in denen die Pbn zunächst durch Ausprobieren das Ziel (den Ausgang, beziehungsweise eine sich öffnende Tür) finden und den Weg dorthin lernen sollten. Nach diesen drei Lerndurchgängen folgte ein Testdurchgang, in dem die Pbn an einen anderen Startpunkt gesetzt wurden, der geometrisch aber dem ursprünglichen Startpunkt entspricht (vgl. Abb.16). Nun gab es zwei Möglichkeiten, den Weg zum Ausgang anzusteuern: anhand des abzulaufenden Weges (internale Navigationsstrategie) oder anhand der externen Landmarken (externale Navigationsstrategie), die nun in einem anderen Verhältnis zum Startpunkt stehen als in den ersten drei Durchgängen. Je nachdem, welchen Ausgang die Pbn nun ansteuern, können sie auch einer der beiden Strategien zugeordnet werden. Abbildung 16 verdeutlicht dies.

Nach dem Testdurchgang folgte eine Kontrollbedingung für die Bildgebung, um die Aktivierung nicht direkt mit der Navigation assoziierter Hirnareale von diesen zu trennen. Die Aufgabe der Pbn im Kontrolldurchgang bestand darin, einer weißen, auf dem Boden des Labyrinths gezeichneten Linie zu folgen. Dies dürfte vom visuellen

Input her und von den motorischen Anforderungen mit den Experimentalbedingungen vergleichbar sein.

Zwischen den einzelnen Durchgängen gab es Ruhephasen (Dauer 15 Scans), die zur Baseline-Bestimmung notwendig sind. Die so genannte Baseline dient als Referenzwert, das heißt zur Bestimmung der neuronalen Grundaktivierung einzelner Pbn. Jeder Mensch hat auch im Ruhezustand unterschiedlich starke MR-Signale, zum Vergleich zwischen der Aktivierungszunahme durch Stimulation ist eine individuelle Referenz daher zwingend notwendig. Die fMRI-Messung begann erst nach dem zweiten Lerndurchgang (vgl. Abb. 17). Eine Messung während der ersten beiden Lerndurchgänge erschien unnötig, da hier schwer zu interpretieren sein dürfte, was die Pbn in dem Moment, in dem sie anfangen den Ausgang durch Versuch und Irrtum zu finden, kognitiv gerade leisten.

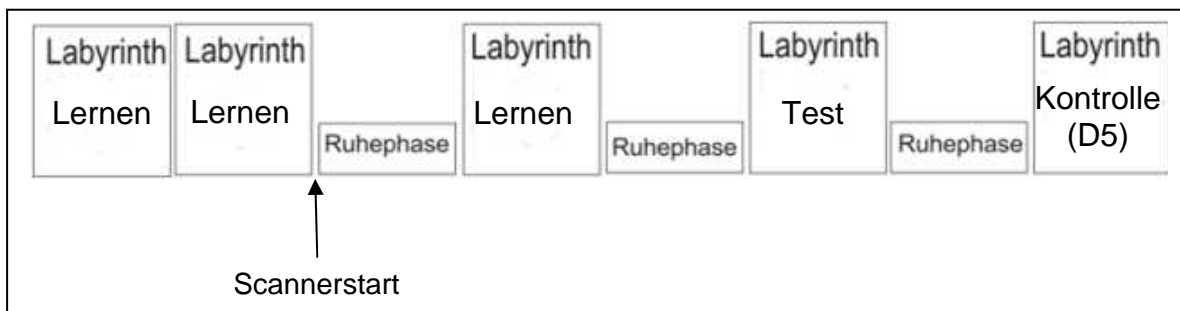


Abb. 17: Ablauf eines Trials des Virtuellen Labyrinths während des fMRI, dargestellt als Boxcar-Funktion. Der Tomograph startet mit der Messung erst nach dem zweiten Lerndurchgang, die Ruhephase dient der Baseline-Erhebung. Im Testdurchgang werden die Pbn im Labyrinth an einen anderen Startpunkt gesetzt. Anhand der Tür, durch die sie dann das Labyrinth verlassen, können sie einer Strategiegruppe zugeordnet werden. Im Kontrolldurchgang sollen die Pbn einem weißen Strich auf dem Boden des Labyrinths folgen. Dies dient als Vergleichsbedingung für die beiden interessierenden Bedingungen Lernen und Test.

Während sich in der ersten Studie im Testdurchgang nur eine Tür öffnete und damit als richtig gelten konnte, öffnen sich nun im Testdurchgang alle Türen bis auf die, durch die der Pb in das Labyrinth gelangt ist. Der Pb wird auch hier wieder im Labyrinth umgesetzt, kann aber mit jeder denkbaren Strategie zum Ziel finden. Anhand der Tür, durch die der Pb im letzten Durchgang geht, kann er einer der beiden Strategien zugeordnet werden (vgl. Abb.16). Es ist natürlich auch denkbar, dass er durch eine Tür geht, die weder der einen noch der anderen Strategie zuzuordnen ist, dies ist aber unwahrscheinlich. Für den Fall, dass es eine dritte Strategie gibt, wurden dennoch alle Türen im Testdurchgang „offen gehalten“.

Diese Modifizierung hatte zum Ziel zu verhindern, dass Pbn während der Testung ihre Strategie verändern, so dass sie nicht mehr klar einer Strategiegruppe zuzuordnen sind. Zusätzlich verhinderte dies, dass sich Pbn in denjenigen Bedingungen übermäßig ärgern, in denen ihre spontan präferierte Strategie nicht zum Ziel führt. Ein

solches Ärgern könnte zu ungewollten Aktivierungen etwa in limbischen Regionen führen.

Aufgrund dieser Modifizierung sind Kontrolldurchgänge, wie sie in der ersten Studie eingesetzt wurden, nicht mehr notwendig, so dass es nunmehr vier und nicht sechs Labyrinth-Trials pro Pb gibt. Für die Leistungsparameter wurden die Leistungen im letzten unveränderten Durchgang, also im dritten Lerndurchgang verwendet.

3.2.4.2 Fragebögen

Nach der fMRI-Untersuchung wurde den Pbn wie in Studie 1 die Alltags-Strategie-Skala (ASS, vgl. Abschnitt 2.2.3.3) vorgelegt. Zudem wurde ein Fragebogen entwickelt (maze-FB), der augenscheinlich so konstruiert war, dass er die beiden Strategien (externale und internale Strategie) im Labyrinth möglichst gut abbildet und an dessen Ende erneut darum gebeten wurde, den Grundriss des Labyrinths aufzuzeichnen (vgl. Anhang D).

Zusätzlich dazu wurde ein Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (QSR=*Questionnaire on Spatial Representations*) hinzugefügt (Pazzaglia & De Beni, 2001; deutsch von Stefan Münzer, Klaus Gramann, und Christoph Hölscher). Die deutsche Version (dQSR) ist weitestgehend validiert (vgl. z.B. Münzer, 2007) und stellt damit ein besseres Verfahren als die ASS dar (vgl. Anhang E). Im QSR werden fünf Faktoren mit unterschiedlich vielen Items abgefragt. Insgesamt besteht der Fragebogen aus 11 Items. Pazzaglia und De Beni (2001) ermittelten faktorenanalytisch fünf Faktoren: 1. allgemeiner Orientierungssinn (*sense of direction*), 2. kardinale Richtungen (wie Norden, Süden usw.), 3. Überblicksstrategie, 4. Landmarkenstrategie und 5. Routenstrategie. Die deutsche Übersetzung wurde an 272 Psychologiestudierenden getestet (Münzer, 2007). Eine Faktorenanalyse ergab gegenüber dem italienischen Original andere Faktoren, die nur bedingt vergleichbar sind und die zum Teil auch durch andere Items abgedeckt werden (vgl. Tab.14). Es wurden folgende Faktoren gefunden: 1. Orientierungs- oder Richtungssinn (*sense of direction*), 2. Überblick versus Landmarken, 3. Kardinale Richtungen, 4. (verbale) Routenbeschreibungen und 5. Routenerinnern (vgl. Münzer, 2007). Beispielfhaft werden in Tabelle 14 Items der englischen und der deutschen Version zu den verschiedenen Faktoren aufgeführt. Im Folgenden wurden zur Auswertung der eigenen Daten die Ergebnisse und somit Faktoren der deutschen Stichprobe genutzt.

Tab.14: Faktoren des QSR (englische Übersetzung der italienischen Originalversion) und des dQSR (deutsche Übersetzung der englischen Version) mit einzelnen Beispielitems.

Englische Version des QSR (Pazzaglia & De Beni, 2001)		Deutsche Übersetzung des QSR = dQSR	
Faktor	Beispielitems	Faktor	Beispielitems
Sense of direction	1. "Do you think you have a good sense of direction?" 8. "In a complex building (store, museum) do you think spontaneously and easily about your direction in relation to the general structure of the building and the external environment?"	Orientierungssinn (<i>sense of direction</i> = SoD)	1. "Denken Sie, dass Sie einen guten Orientierungssinn haben?" 8. „Können Sie sich in einem komplexen Gebäude (Einkaufszentrum, Museum, etc.) spontan und ohne Probleme Ihre Ausrichtung (Orientierung) in Bezug auf die Gebäudestruktur und die äußere Umgebung vorstellen?"
Überblicks-repräsentation	3c. „Think about the way you orient yourself in different environments around you. Would you describe yourself as a person who tries to create a mental map of the environment?" 7a. "Someone is describing for you the route to reach an unfamiliar place. Do you prefer to make an image of the route?"	Überblick versus Landmarke	3b. "Stellen Sie sich vor, wie Sie sich in verschiedenen Umgebungen orientieren. Würden Sie sich als eine Person beschreiben, die sich orientiert, indem sie nach Ihr bekannten Punkten oder Plätzen (Gebäuden, Geschäften, Denkmäler usw.) schaut?" (negative Polung) 4a. „Denken Sie an eine Ihnen nur wenig vertraute Stadt und versuchen Sie, sich diese Stadt vorzustellen. Jetzt versuchen Sie bitte anzugeben, wie Sie sich die Stadt vorstellen: Ich stelle mir die Stadt aus einer „Vogelperspektive“ vor, ähnlich wie auf einer Karte."
Kardinale Richtungen	5. „When you are in a natural, open environment (mountains, seaside, country) do you naturally individuate cardinal points, that is where north, south, east, and west are?"	Kardinale Richtungen	5. "Wenn Sie sich in natürlichem, offenem Gelände (Berge, Küste, Land) befinden, wissen Sie dann, wo Norden, Süden, Osten und Westen ist?"
Landmarkenzentriert	3b. „Think about the way you orient yourself in different environments round you. Would you describe yourself as a person who orients him/herself by looking for well-known landmarks?"	Routen (visuell versus verbal)	7a. "Jemand gibt Ihnen eine Wegbeschreibung zu einem Ihnen unbekanntem Ort. Werden Sie eher sich den Weg bildhaft im Kopf vorstellen?" 7b. „Jemand gibt Ihnen eine Wegbeschreibung zu einem Ihnen unbekanntem Ort. Werden Sie sich eher die sprachliche Wegschreibung merken?" (negative Polung)
Routenpräferenz	3a. „Think about the way you orient yourself in different environments around you. Would you describe yourself as a person who orients him/herself by remembering routes connecting one place to another?"	Routen	3a. „Stellen Sie sich vor, wie Sie sich in verschiedenen Umgebungen orientieren. Würden Sie sich als eine Person beschreiben, die sich orientiert, indem sie sich an bekannte Wege erinnert, die Orte miteinander verbinden?"

3.2.5 Analyse der Speichelproben

Die Analyse der Konzentrationen der Sexualhormone im Speichel erfolgte wie in der ersten Teilstudie (vgl. Abschnitt 2.2.4) mit Hilfe von Lumineszenz-Immunoassays der Firma IBL. Es sei jedoch erwähnt, dass inzwischen eine Verbesserung der Östradiol-Kits stattgefunden hatte.

3.2.6 Analyse der Blutproben

Die entnommenen Blutproben der Pbn wurden nach Entnahme innerhalb einer Stunde durch die Abteilung Klinische Chemie der Universitätsmedizin Göttingen zentrifugiert und anschließend bei -20° Celsius eingefroren. Erst nach Abschluss der Tests wurde das Material analysiert.

Die Konzentrationen der Sexualhormone Östradiol, Progesteron und Testosteron wurden mit Hilfe von Radio-Immuno-Assays bestimmt. Beispielhaft soll dieses Vorgehen anhand von Testosteron erläutert werden: Bei dieser Bestimmungsmethode konkurriert radioaktiv markiertes Testosteron mit der Testosteronkonzentration des Serums der einzelnen Pbn um die Bindung an Testosteron-Antikörpern, welche auf Polypropylen-Röhrchen aufgebracht werden. Dieser Prozess läuft im Rahmen einer vorgegebenen Zeit ab. Durch Abtrennung des Röhrchens kann das freie von dem gebundenen Testosteron unterschieden werden. Daraufhin wird eine Messung der Konzentration mittels Gamma-Zähler durchgeführt und die jeweiligen Hormonwerte werden anhand einer Standardkurve ermittelt.

Diese Analysen wurden freundlicherweise von Mitarbeitern der Abteilung Klinische Chemie/Zentrallabor der Universitätsmedizin Göttingen unter der Leitung von Prof. Oellerich und mit Unterstützung von PD Dr. med. von Ahsen und Dr. med. Brandhorst durchgeführt.

3.2.7 Analyse der fMRI-Daten

3.2.7.1 Vorverarbeitung (Preprocessing)

Die Auswertung der anatomischen und funktionellen Daten der MR-Messungen erfolgte mittels SPM Version 5.0¹⁶. Diese Verarbeitung wurde nach den Arbeitsanweisungen von Friston, Ashburner, Kiebel, Nichols und Penny (2007) vorgenommen. Zur Beseitigung von Artefakten in den Daten, wie etwa die Bewegungen der Pbn, erfolgte zunächst eine

¹⁶ Statistical Parametric Mapping: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

mehrstufige Vorverarbeitung (*preprocessing*, vgl. Abb. 18). Die wichtigsten Schritte des *Preprocessings* bestehen aus der Bewegungskorrektur (*Realignment*), der Normalisierung und der räumlichen Glättung (*Smoothing*) (vgl. Anhang I).

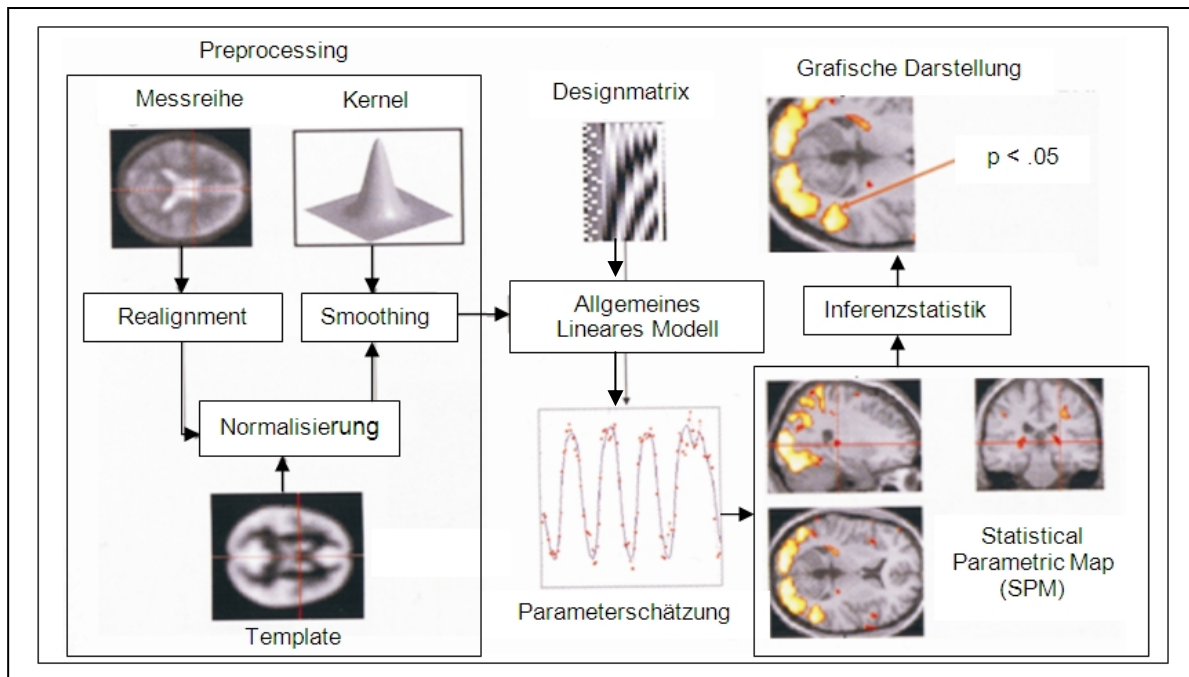


Abb. 18: Schematische Darstellung der einzelnen Verarbeitungsschritte der fMRI-Daten (Abb. nach Friston et al., 2007, S. 312 nebenstehend, einzelne Veränderungen durch die Autorin)

Zunächst wurde die Bewegungskorrektur vorgenommen. Das erste funktionelle Bild wurde dabei als Referenzbild verwendet. Es gingen nur Daten in die weiteren Berechnungen ein, deren Bewegungsamplitude nicht größer als 2 mm in den drei Raumachsen beziehungsweise $0,5^\circ$ Rotation um diese Achsen waren.

Im nächsten Schritt wurde die Normalisierung vorgenommen. Dazu wurde die mit SPM 5 mitgelieferte Vorlage (*Template*) eines T1-Bildes genutzt. Im Rahmen der Normalisierung ist es notwendig, aus den bisher quaderförmigen Voxeln quadratische Voxel zu machen. Um die Ursprungsgröße von 16 mm^3 unter Einbezug der 1mm dicken Schichtlücke nahezu beizubehalten¹⁷, wurde im Rahmen der Normalisierung eine Voxelgröße von $2,7 \times 2,7 \times 2,7$ eingestellt.

Als letzter Schritt der Vorverarbeitung erfolgte die räumliche Glättung der Daten (*Smoothing*). Die Festlegung der Bewertung der Nachbarschaft erfolgte durch eine Filtermaske, einen so genannten Kernel. Hier erfolgte dies mit Hilfe eines

¹⁷ Das gemessene Voxel von 16 mm^3 ergab sich aus der Bemessung $2 \times 2 \times 4 \text{ mm}$. Durch den Einbezug des so genannten *gap* (Schichtlücke) errechnet sich die Voxelgröße nun durch die Bemessung $2 \times 2 \times 5$, so dass man von einem empirischen Voxel von 20 mm^3 ausgehen muss. Dies entspricht annähernd der theoretischen und quadratischen Bemessung von $2,7 \times 2,7 \times 2,7 = 19,68$

dreidimensionalen Gauß-Filters mit 5,4 mm Halbwertsbreite (doppelte Voxelgröße). Das Signal-Rausch-Verhältnis wird auf diese Weise deutlich verbessert.

3.2.7.2 Analyse der Aktivierungsdaten

Nach dem Abschluss der Vorverarbeitung wurden die Daten einer statistischen Analyse unterzogen (vgl. Abb.18, sowie Anhang I). Ziel dieser Analyse ist es, Areale zu finden, in denen die neuronale Aktivität während der Navigation höher ist als in der Ruhebedingung (*Baseline*). Die weitere Analyse lässt sich in folgende Teilschritte untergliedern: Erstellung des statistischen Modells, dessen statistische Überprüfung, sowie die grafische Darstellung der Ergebnisse.

Das statistische Modell auf Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells wird in SPM 5 in einer Designmatrix spezifiziert. Jede Spalte dieser Designmatrix entspricht einer Bedingung des Experimentes und jede Zeile einem Scan (vgl. Abb. 19).

Um das zu erwartende MR-Signal möglichst genau zu modellieren, wurde zur Kodierung der experimentellen Bedingungen eine Kombination aus einer Rechteckfunktion (Boxcar-Funktion), die den experimentellen Bedingungen entspricht (vgl. Abb.17), und der zu erwartenden hämodynamischen Antwort genutzt.

Nachdem die β -Gewichte geschätzt wurden, können die entsprechenden Hypothesen überprüft werden. Dazu erfolgt der inferenzstatistische Vergleich der jeweiligen β -Gewichte der einzelnen Experimentalbedingungen. Diese Vergleiche werden auch statistische Kontraste genannt. Unter zusätzlicher Beachtung des Restfehlers kann somit die Signifikanz bestimmter Effekte und deren Zuverlässigkeit für den einzelnen Pbn und innerhalb der Gesamtstichprobe beurteilt werden.

Einzelprobandenanalyse (First-Level-Analyse)

Die First-Level-Analyse erlaubt statistische Inferenzen über die Effekte innerhalb eines Pbn. Dabei wird ausschließlich die intraindividuelle Varianz berücksichtigt. Für jeden einzelnen Pbn musste nun zunächst eine Designmatrix gebildet werden, die definiert, wann sich der Pb in einer der drei Experimentalbedingungen (D3: letzter Lerndurchgang, D4: Testdurchgang, D5: Kontrollbedingung) und wann in der Ruhephase befunden hat. Da es für die Pbn keinerlei zeitliche Begrenzung in den Durchgängen gab, befand sich jeder Pb auch unterschiedlich lange in den verschiedenen Bedingungen und lieferte somit unterschiedlich viele Bilder pro Bedingung.

Es musste also festgelegt werden, welches fMRI-Bild in welcher Bedingung aufgenommen wurde und wie viele Bilder insgesamt. Somit wurden 22 Einzeldesignmatrizen gebildet (vgl. beispielhaft Abb. 19).

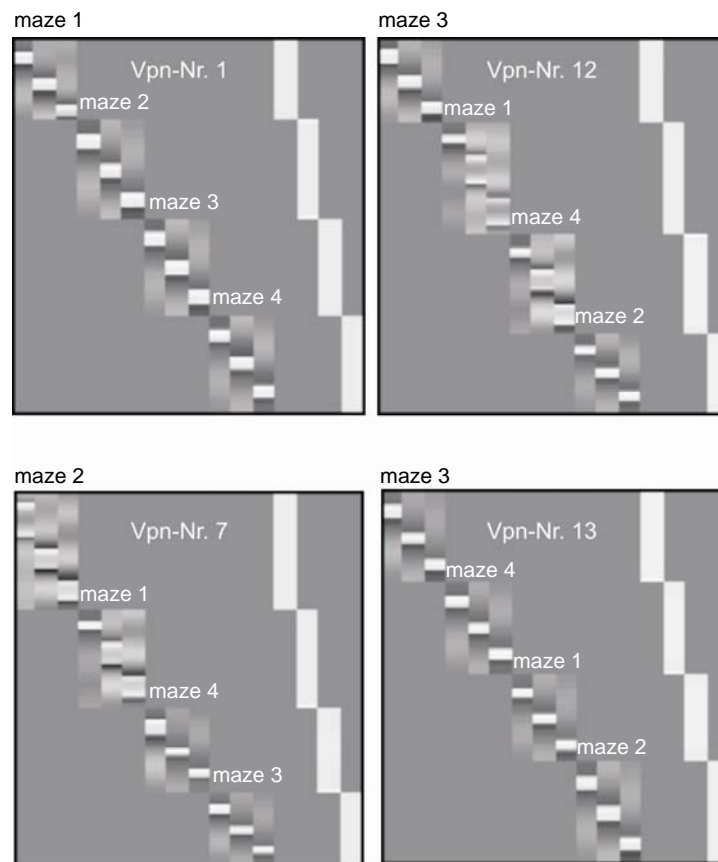


Abb. 19: Beispiele für vier (von 22) Designmatrizen (linke Spalte zwei Männer, rechte Spalte zwei Frauen). Jeder Labyrinth-Trial (maze) bestand aus drei gemessenen Durchläufen (D3: letzter Lerndurchgang, D4: Testdurchgang, D5: Kontrollbedingung).

Aufgrund dieser Designmatrix konnte nun für jeden Pbn ein Modell, also die Betas geschätzt werden. Anhand dieser Betas wurden nun inferenzstatistische Vergleiche zum Beispiel zwischen Ruhebedingung (Baseline) und Navigation oder zwischen den beiden Navigationsbedingungen und der Kontrollbedingung möglich. Aufgrund der Kontrastberechnungen wurden von SPM 5 so genannte T-images erstellt: Es werden unter Angabe eines bestimmten Signifikanzniveaus t-Werte für den Vergleich der einzelnen β -Werte für jedes einzelne Voxel berechnet. Die im Kontrast signifikant unterschiedlich stark aktivierten Voxel werden in unterschiedlichen Grautönen dargestellt.

Gruppenanalyse (Second-Level-Analyse)

Im Rahmen dieser Studie waren weniger die Einzelaktivierungen einzelner Pbn interessant, sondern vielmehr Gruppeneffekte. Deswegen schloss sich an die Einzelprobandenanalyse eine Gruppenanalyse, die so genannte Second-Level-Analyse an. Ziel ist es dabei, diejenigen Areale aufzufinden, die bei allen Pbn maximal ähnlich aktiviert wurden. Für diese Analyse wurden in SPM die relevanten Kontrastbilder (con_*.img), die in der First-Level-Analyse für jede Person inferenzstatistisch (t-Test) erstellt wurden, ausgewählt und in ein zweites Modell eingegeben. Dann wurde mittels Varianzanalyse getestet, ob die Effektstärken der Kontraste über alle Pbn signifikant größer als Null sind. Für diese Untersuchung wurden erneut entsprechende Modelle erstellt (vgl. Abb. 20). Es wurden zwei zweifaktorielle Modelle erstellt. Im ersten Modell sind die zwei Faktoren Geschlecht (zweistufig) und Bedingung (dreistufig) (vgl. Abb.20a), das heißt die drei gemessenen Durchgänge des Virtuellen Labyrinths: letzter Lerndurchgang (D3), Testdurchgang (D4) und der Kontrolldurchgang (D5).

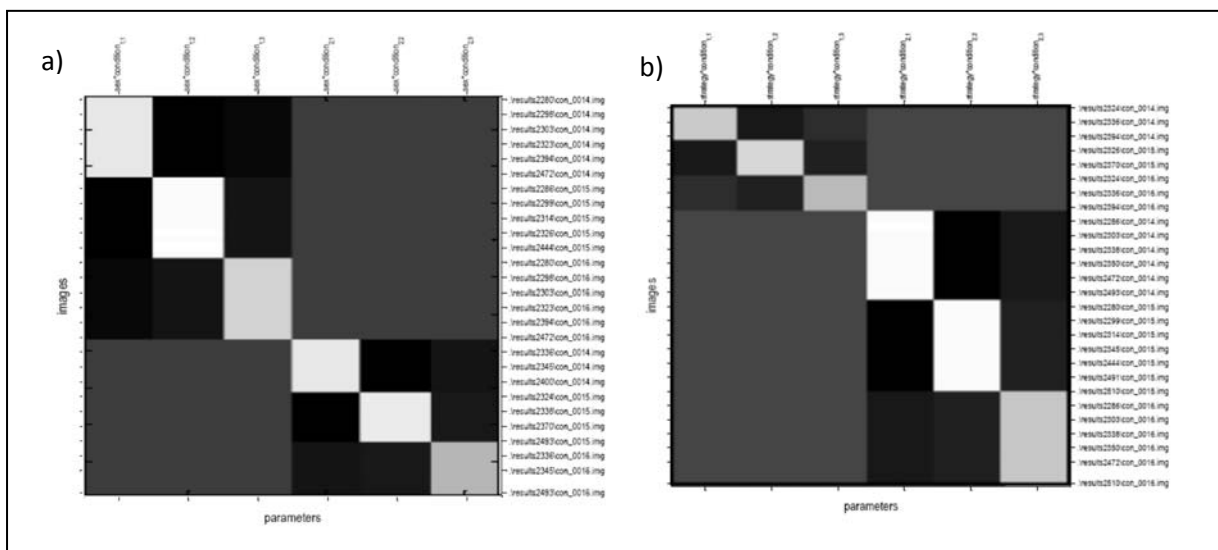


Abb. 20: Second-Level-Modelle: a) Männer und Frauen: In den Zeilen stehen die verwendeten con-Images (z.B. oberste Zeile: Kontrast D3 gegen Baseline für den ersten männlichen Pb), in den Spalten die jeweiligen Parameter des Modells, das heißt die Experimentalbedingungen, (z.B. ganz links: D3 (letzter Lerndurchgang)/Männer, ganz rechts Kontrollbedingung / Frauen). Die zwei großen dunklen Blöcke stellen die beiden Geschlechtergruppen dar: Links Männer, rechts Frauen. b) Pbn mit internaler und externaler Strategie: Ebenfalls stehen in den Zeilen die verwendeten con-Images (z.B. oberste Zeile: Kontrast D3 gegen Baseline für den ersten Pb mit externaler Strategie), in den Spalten die jeweiligen Parameter des Modells (z.B. ganz links: D3 (letzter Lerndurchgang)/externaler Strategie, ganz rechts Kontrollbedingung / internale Strategie). Die zwei großen dunklen Blöcke stellen die beiden Strategiergruppen dar: Links externaler Strategie, rechts internale Strategie.

Im zweiten Modell wird das Modell ebenfalls durch den Faktor Bedingung und zusätzlich dazu durch den Faktor Navigationsstrategie (zweistufig: externaler versus internale Strategie) gebildet (vgl. Abb. 20b). Auf First-Level-Ebene wurden folgende relevanten Kontraste erstellt: Alle vier Lerndurchgänge (D3), während denen der

Scanner lief, gegen Baseline; alle vier Testdurchgänge (D4) gegen Baseline; alle vier Kontrollbedingungen (D5) gegen Baseline, sowie für die multiple Regression der Kontrast alle Navigationsbedingungen, das heißt D3 und D4, gegen die Kontrollbedingung (D5). In Abbildung 20 sind nur die genannten Baseline-Kontraste aufgeführt. In den Zeilen finden sich die con-Images, zum Beispiel D3 gegen Baseline für den ersten Pbn und so weiter.

3.2.7.3 Bestimmung der Hirnregionen

Die Bestimmung, in welchen Hirnregionen neuronale Aktivierung zu finden ist, beruht auf der freien *Anatomy Toolbox v1.5*¹⁸ (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005), die in SPM 5 integrierbar ist. Dieses Werkzeug dient der automatisierten Übereinanderlegung probabilistischer cytoarchitektonischer Karten des Gehirns mit funktionellen MR-Daten. Es bezieht sich mit seinen räumlichen Koordinaten bezüglich anatomischer Strukturen auf das Standardgehirn des Montreal Neurology Institute (MNI). Zur Bestimmung funktioneller Areale beruft sich die Anatomy Toolbox auf die zahlreichen Daten bezüglich probabilistischer cytoarchitektonischer Karten (s.u.).

Probabilistische cytoarchitektonische Karten sind dreidimensionale Karten der menschlichen Hirnrinde, subkortikaler Kerngebiete und Faserbahnen, erstellt anhand anatomischer, cytoarchitektonischer Kriterien in post mortem-Gehirnen (vgl. Amunts & Zilles, 2007).

Man geht davon aus, dass Cortexareale, die aufgrund ihrer Cytoarchitektur voneinander abgrenzbar sind, als funktionelle Module begriffen werden können. Das heißt cytoarchitektonische gilt als ein Marker für funktionelle Andersartigkeit (für einen Review vgl. z.B. Passingham, Stephan, & Kotter, 2002). Deswegen arbeiten viele Arbeitsgruppen daran, die Cytoarchitektur des Cortex genau zu analysieren und Karten des Gehirns zu erstellen. Neu ist die Idee cytoarchitektonischer Karten nicht, da bereits Brodmann (1909) funktionelle Areale (die Brodmann-Areale) anhand histologischer Untersuchungen der Großhirnrinde diskriminiert hat.

Die probabilistischen cytoarchitektonischen Karten bieten im Gegensatz zu diesen klassischen Karten zuverlässigere Information, da sie auf einer beobachterunabhängigen Analyse an mehreren post mortem-Gehirnen beruhen. Zusätzlich dazu sind sie dreidimensional. Das ist deswegen wichtig, da Karten wie die Brodmanns meist nur die sichtbare Cortexoberfläche darstellen, die Tiefe der Sulci wird dabei nicht berücksichtigt (vgl. zu diesem Vorgehen auch Amunts & Zilles, 2007).

¹⁸ http://www.fz-juelich.de/inb/inb-3//spm_anatomy_toolbox

Probabilistisch sind diese cytoarchitektonischen Karten deshalb, da Gehirne so hochgradig individuell sind wie der menschliche Fingerabdruck und bei jedem einzelnen Menschen bestimmte Hirnareale woanders liegen können als bei jedem beliebigen Anderen (z.B. Amunts, Malikovic, Mohlberg, Schormann, & Zilles, 2000; Geyer, Schleicher, & Zilles, 1999). Die Mittelung über zehn verschiedene Gehirne trägt dieser Individualität Rechnung und kann somit für bestimmte Volumen im Gehirn eine Wahrscheinlichkeit benennen, mit der ein bestimmtes funktionelles Areal an dieser Stelle zu lokalisieren ist. In den Ergebnistabellen der vorliegenden Studie findet sich deshalb immer eine Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der eine Koordinate ein bestimmtes funktionelles Areal repräsentiert.

Die Erstellung dieser probabilistischen Karten ist noch in Bearbeitung, weswegen noch nicht für alle Hirnareale solche Wahrscheinlichkeitsinformationen vorhanden sind. Sind keine Wahrscheinlichkeiten angegeben, so gibt es dafür keine Informationen.

Folgende Arbeiten zu cytoarchitektonischen Karten sind die Grundlage der hier angegebenen Wahrscheinlichkeiten: Aussagen bezüglich des primären Motorcortex (Areas 4a, 4p) begründen sich auf der Arbeit von Geyer et al. (1996) und bezüglich prämotorischer Areale (vor allem Area 6, SMA) auf den Analysen von Geyer (2003). Aussagen bezüglich des somatosensorischen Cortex beziehen sich auf die Arbeiten von Geyer, Schormann, Mohlberg und Zilles (2000) (Areas 1, 3a, 3b) und Grefkes, Geyer, Schormann, Roland und Zilles (2001) (Area 2). Aussagen bezüglich des parietalen Operkulum (OP) werden durch die Arbeiten von Eickhoff und Kollegen (Eickhoff, Schleicher, Zilles, & Amunts, 2006; Eickhoff, Amunts, Mohlberg, & Zilles, 2006) und bezüglich des intraparietalen Sulcus von Choi und Kollegen (2006) fundiert. Die Cytoarchitektur des visuellen Cortex wurde von Amunts et al. (2000) (Areas 17 und 18) und Malikovic et al. (2007) (hOC5) untersucht und der Hippocampus schließlich von Amunts et al. (2005).

Wenn die Anatomy Toolbox keine Aussagen bezüglich des anatomischen Ortes eines Volumens machte, so wurde auf den Talairach Client 2.4¹⁹ zurückgegriffen, der sich auf den Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) beruft. Dieser hat jedoch lediglich ein einzelnes Gehirn zur Grundlage, anders als etwa das Montreal Standardgehirn.

¹⁹ <http://www.talairach.org/client.html>

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Analyse der Sexualhormone

Die deskriptive Statistik in Tabelle 15 zeigt die Mittelwerte von Männern und Frauen bezüglich der Hormonkonzentrationen von Östradiol, Progesteron und Testosteron im Speichel, sowie im Serum (Blut).

Die Werte für beide Geschlechter sind plausibel, wenngleich einzelne Pbn leicht aus der Norm fallen. Die Testosteronwerte im Speichel aller Männer befinden sich im durch die Firma IBL angegebenen Referenzbereich. Unter den weiblichen Teilnehmerinnen wies eine Frau eine minimal erhöhte Testosteronkonzentration im Speichel auf, alle anderen befanden sich jedoch im Referenzbereich. Die Analysen von Progesteron und Östradiol im Speichel erbrachten, dass alle Frauen im Normbereich des jeweiligen Testkits lagen. Bei einem Mann fand sich ein leicht erhöhter Progesteronwert und bei vier Männern konnte ein etwas zu hoher Östradiolwert festgestellt werden. Bezüglich der restlichen Sexualhormone befanden sich alle erhobenen Daten im Referenzbereich.

Die Werte von Serum und Speichel korrelieren relativ hoch miteinander. Für Östradiol findet sich eine Korrelation von $r=.669$ [$p=.001$; $R^2=.45$], für Progesteron von $r=.871$ [$p=.000$; $R^2=.76$] und für Testosteron von $r=.902$ [$p=.000$; $R^2=.81$].

Tab.15: Sexualhormone in den Geschlechtern, Zusammenhang der Serum- und Speichelwerte, sowie Unterschied der Geschlechter bezüglich der Sexualhormonkonzentrationen.

	Männer n=11 Mittelwert (SD)	Frauen n=11 Mittelwert (SD)	Korrelation Serum/Speichel	t-Test Gruppenvergleich Männer vs. Frauen
Östrogen Speichel pg/ml	2.95 (1.54)	5.53 (3.23)	$r=.669^{**}$	T= -2.387; $p=.027$
Östrogen Serum ng/l	27.84 (5.38)	152.19 (67.28)		T= 9.019; $p=.000$
Progesteron Speichel pg/ml	39.67 (25.31)	144.09 (102.48)	$r=.871^{**}$	T= -3.281; $p=.004$
Progesteron Serum $\mu\text{g/l}$.69 (.12)	8.19 (7.38)		T= -3.288; $p=.004$
Testosteron Speichel pg/ml	114.96 (32.29)	21.33 (11.93)	$r=.902^{**}$	T= 9.019; $p=.000$
Testosteron Serum ng/l	4.74 (1.04)	.24 (.08)		T= 12.627; $p=.000$

Die Analyse der Hormonwerte ergab, dass sich vier Frauen nicht wie geplant in der Lutealphase ihres Zyklus befanden. Eine der Frauen wies sogar einen vermutlich pathologischen Befund auf, sie könnte eventuell am sog. PCO-Syndrom²⁰ leiden. Diese vier Frauen wurden im Folgenden aus den Analysen zu Geschlechtsdifferenzen ausgeschlossen, so dass hier nunmehr nur 11 Männer und 7 Frauen in die Analysen eingingen. Bei der Analyse von neuronaler Gesamtaktivierung über die gesamte Stichprobe wurden sie jedoch mit aufgenommen, ebenso bei der Analyse neuronaler Unterschiede bei den verschiedenen Strategien. Dabei ist es unerheblich, in welcher Phase ihres Zyklus die Pbn sich befanden.

3.3.2 Verhaltensparameter

3.3.2.1 Leistungsparameter

Die beiden Experimentalgruppen Männer und spontanzyklische Frauen unterschieden sich faktisch nicht in ihren Leistungen im Virtuellen Labyrinth. Da die Anzahl der gemachten Fehler im dritten Lerndurchgang nicht normalverteilt ist, wie ein Kolmogoroff-Smirnoff-Test auf Normalverteilung ergab, wurde ein U-Test nach Mann und Whitney gerechnet.

Die Männer wiesen einen Medianwert der Fehler im letzten Lerndurchgang von $Med=0,0$ auf, Frauen dagegen einen von $Med= 2,0$ [$U=21.5$; $z=1.71$; $p=.126$]. Frauen haben für die Durchlaufdauer im letzten Lerndurchgang einen Median von $Med=29,68$ s, Männer einen von $Med=27.08$ s [$U=26.0$; $z=1.13$; $p=.285$]. Allenfalls tendenziell lässt sich behaupten, dass die Frauen etwas schlechter im virtuellen Labyrinth waren als die Männer (vgl. auch Abb. 21).

Zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen Hormonkonzentrationen und Leistungsparametern im Labyrinth wurde aufgrund der nicht-normalverteilten Fehlerdaten und Zeiten eine nicht-parametrische Spearman-Rangkorrelation gerechnet. Dabei findet sich eine positive Korrelation zwischen Östrogen (Serum) und der Anzahl der gemachten Fehler im Labyrinth [$r=.504$; $p=.017$; $R^2=.20$]: Je mehr Östrogen im Serum desto mehr Fehler wurden gemacht. Das gleiche zeigt sich für einen Zusammenhang zwischen Progesteron und der im Labyrinth gemachten Fehler [$r=.459$; $p=.032$; $R^2=.048$]: Je mehr Progesteron, desto mehr Fehler wurden im Labyrinth gemacht, das heißt desto schlechtere Leistungen wurden erbracht. Für Testosteron konnte keine signifikante Korrelation gefunden werden, diese ist aber tendenziell negativ

²⁰ Polyzystisches Ovarialsyndrom: Häufigste Ursache für Zyklusstörungen und Unfruchtbarkeit bei erwachsenen Frauen (4-12 % aller Frauen im gebärfähigen Alter sind davon betroffen)

[$r=-.274$; $p=.217$; n.s.]. Für die Durchlaufdauer fanden sich keine Zusammenhänge mit den Hormonkonzentrationen.

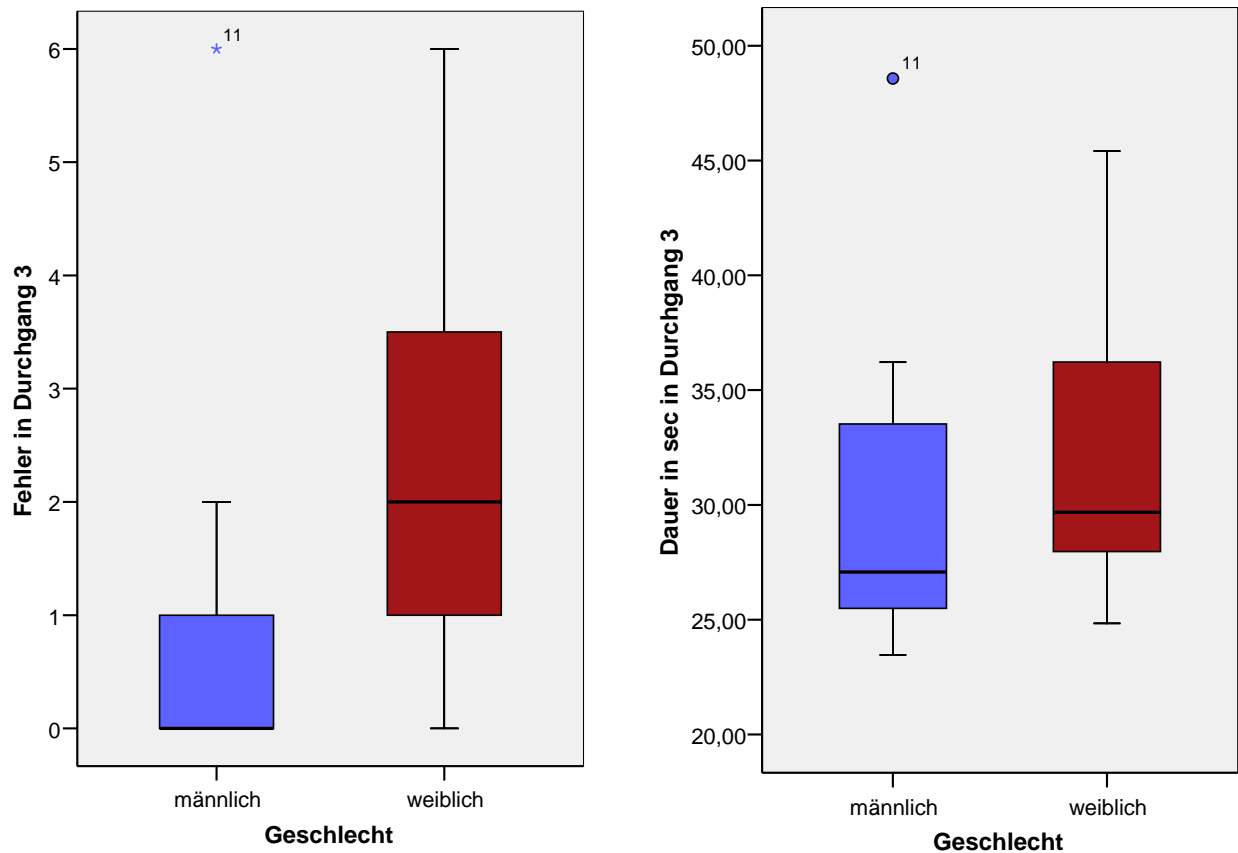


Abb. 21: Boxplots Ergebnisse Leistungen im Labyrinth nach Geschlecht. Links: Anzahl Fehler im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Frauen ($n=7$, $Med=2$) machten nur etwas mehr Fehler als Männer ($n=11$, $Med=0$). Rechts: Mittlere benötigte Zeit in Sekunden im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Männer ($Med=27.08$ s) und Frauen ($Med=29.68$ s) unterschieden sich nahezu nicht in der benötigten Zeit im vorletzten Durchgang.

Männer und Frauen unterschieden sich nicht in der Häufigkeit einer richtigen Wiedergabe des Grundrisses des Labyrinths [$\chi^2=.234$; $df=1$; $p=.629$] (vgl. Tab. 16). Die Entscheidung, ob ein Grundriss als richtig oder falsch wiedergegeben eingeschätzt wurde, folgt dem Vorgehen der ersten Studie (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

Tab.16: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=.234$; $df=1$; $p=.629$		Geschlecht		Randsumme
		Männer	Frauen	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	6 (5,5)	3 (3,5)	9
	nein	5 (5,5)	4 (3,5)	9
Randsumme		11	7	18

3.3.2.2 Strategieunterschiede

Insgesamt wählten von lediglich fünf Pbn eine externe Strategie, das heißt eine Navigationsstrategie anhand der externen Landmarken und 13 Pbn eine interne Strategie, das heißt eine Navigationsstrategie anhand des Antwortverhaltens innerhalb des Labyrinths. Weitere vier veränderten über die vier Testungen ihr Vorgehen und wechselten ihre Strategie. Meistens verwendeten sie jedoch in 3 von 4 Testungen die gleiche Strategie. Lediglich eine Probandin verwendete einmal eine externe, zweimal eine interne und einmal offenbar gar keine Strategie, da sie die einzige war, die jemals eine völlig andere Tür geöffnet hat. Dennoch wurden in allen weiteren Analysen nur diejenigen als Internale und Externale klassifiziert, die konsequent über alle vier Testungen bei einer Strategie geblieben sind. In den präferierten Navigationsstrategien unterschieden sich Männer und Frauen nicht [$\chi^2= 1.31$, $df=2$, $p=.52$].

Tab. 17: Kreuztabelle Geschlecht und Navigationsstrategien im Virtuellen Labyrinth anhand der angesteuerten Tür im Testdurchgang mit χ^2 -Test-Ergebnis: Männer und Frauen unterschieden sich nicht in ihrer Strategiewahl. Es wählten insgesamt nur 5 Pbn eine externe Strategie. Diejenigen, die eine durchgehend interne Strategie wählten waren jedoch meist Männer. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2= 1.31$, $df=2$, $p=.52$		Strategiegruppe			Randsummen
		Externale Strategie	Internale Strategie	„Switcher“	
Geschlecht	männlich	2 (3,1)	7 (6,1)	2 (1,8)	11
	weiblich	3 (1,9)	3 (3,9)	1 (1,2)	7
Randsummen		5	10	3	18

Tab.18: Ergebnisse einer punkt-biserialen Korrelation zwischen Strategiegruppenzugehörigkeit und Sexualhormonkonzentration (n=18).

	Korrelationskoeffizient Strategiegruppe (Kodierung: Externale=1 Internale=2)	p-Wert		Korrelationskoeffizient Strategiegruppe (Kodierung: Externale=1 Internale=2)	p-Wert
Östrogen Speichel pg/ml	-.038	.882	Östrogen Serum ng/l	.024	.925
Progesteron Speichel pg/ml	.036	.888	Progesteron Serum µg/l	-.159	.528
Testosteron Speichel pg/ml	.273	.274	Testosteron Serum ng/l	.092	.715

Die Sexualhormone hatten keinen Einfluss auf die bevorzugte Strategiewahl. Tabelle 18 kann man entnehmen, dass eine punkt-biseriale Korrelation keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Strategiewahl und irgendeinem der drei Sexualhormone aufzeigt. Dies ändert sich auch nicht, wenn man dies nach Geschlechtern getrennt auswertet.

3.3.3 Fragebogendaten

Die Ergebnisse der drei Strategiefragebögen (maze-FB, ASS, QSR) über alle Pbn sind Tabelle 19 zu entnehmen.

Tab.19: Deskriptive Statistiken der drei Navigationsstrategiefragebögen. Maze-FB (maze-Fragebogen); ASS (Alltags-Strategieskala); QSR (Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen). SoD=*sense of direction*=Orientierungssinn. Es sind in allen drei Fragebögen höchstens Werte zwischen 1 und 5 möglich.

Fragebogen	Maze-FB		ASS		QSR (deutsche Faktoren)				
	internal	external	Route	Orientierung	SoD	Überblick	Richtungen	Routen (visuell/verbal)	Routen
Mittelwert (SD)	3.79 (.88)	2.98 (.98)	3.69 (.32)	2.91 (.58)	3.20 (.66)	2.27 (.93)	3.11 (.56)	3.23 (.81)	3.73 (.95)
Range	2.33- 5.0	1.67- 5.0	3.0-4.5	1.75-3.75	1.75-4.2	1.0-4.75	2.0-4.0	2.0-4.50	1.5-5.0

Die Korrelationen der Skalen untereinander sind der Korrelationsmatrix in Tabelle 20 zu entnehmen. Die beiden Unterskalen des maze-Fragebogens korrelieren negativ miteinander [$r=-.532$; $p=.011$; $R^2=.283$]. Das bedeutet, dass diese nicht unabhängig voneinander sind. Die beiden Unterskalen der Alltags-Strategieskala (ASS) sind dagegen unabhängig voneinander [$r=-.207$; $p=.356$; n.s.]. Auch die Skalen des Fragebogens zu räumlichen Repräsentationen (dQSR) sind alle unabhängig voneinander mit Korrelationskoeffizienten zwischen $-.142$ bis $.218$ (vgl. Tab. 20).

Die Skalen des maze-Fragebogens sind nicht unabhängig von den Skalen der anderen beiden Strategiefragebögen. Die internale Skala des maze-Fragebogens korreliert signifikant positiv mit der Skala *Orientierungsstrategie* der ASS [$r=.424$; $p=.049$; $R^2=.18$], sowie tendenziell mit dem Faktor *Überblick* des dQSR [$r=.417$; $p=.053$; $R^2=.17$]. Das heißt, Pbn mit einer eher internalen Navigationsstrategie (laut Fragebogen) nutzen stärker Orientierungsstrategien und zumindest tendenziell mehr Überblicksstrategien anstatt Landmarkenstrategien. Die externale Skala korreliert dagegen signifikant positiv mit dem Faktor *Routen* des dQSR [$r=.540$; $p=.009$; $R^2=.29$] und signifikant negativ mit dem Faktor *Überblick* [$r=-.435$; $p=.043$; $R^2=.19$]. Das heißt, Pbn mit externaler Strategie (laut

Fragebogen) geben sehr häufig an Routenstrategien zu verwenden und nutzen eher Landmarkenstrategien als Überblickswissen wie eine kognitive Karte.

Tab.20: Korrelationsmatrix: Zusammenhänge zwischen den einzelnen Subskalen der verschiedenen Strategiefragebögen (maze, ASS, QSR): Korrelationskoeffizienten r (p-Wert). Signifikante Korrelationen sind fett gedruckt. (N=22) (SoD=*sense of direction*=Orientierungssinn)

Fragebogen	Subskalen	Maze-FB		ASS		QSR (deutsche Faktoren)				
		internal	external	Route	Orientierung	SoD	Überblick	Richtungen	Routen (visuell/verbal)	Routen
Maze -FB	internal	1								
	external	-.532 (.011)	1							
ASS	Route	-.276 (.214)	.388 (.075)	1						
	Orientierung	.424 (.049)	-.344 (.117)	-.207 (.356)	1					
dQSR (deutsche Faktoren)	SoD	-.290 (.191)	-.314 (.155)	.034 (.879)	-.162 (.471)	1				
	Überblick vs Landmarke	.417 (.053)	-.435 (.043)	-.035 (.876)	.048 (.831)	2.62 (.239)	1			
	Richtungen	.255 (.253)	-.218 (.330)	.206 (.358)	.158 (.481)	.106 (.639)	.210 (.348)	1		
	Routen (verbal vs visuell)	-.074 (.744)	.124 (.584)	-.321 (.146)	-.254 (.254)	-.015 (.949)	.072 (.750)	-.302 (.172)	1	
	Routen	-.235 (.291)	.540 (.009)	.029 (.896)	.037 (.870)	.033 (.884)	.014 (.950)	.014 (.951)	-.225 (.314)	1

Die Ergebnisse der einzelnen Skalen nach Männern (n=11) und Frauen (n=7) sind Tabelle 21 zu entnehmen. Nach den Fragebogendaten unterschieden sich Männer und Frauen wenig in ihren eingeschätzten Orientierungs-, bzw. Navigationsstrategien. Allerdings schätzten Männer ihren allgemeinen Orientierungssinn (*sense of direction*) signifikant höher ein als Frauen [$t_{16}=2.29$; $p=.018$, $d=1.14$] und berichten etwas häufiger kardinale Richtungen zu nutzen als Frauen [$t_{16}=1.69$; $p=.055$; $d=0.8$].

Auf der externalen Skala des maze-Fragebogens ist eine deutliche Tendenz zu erkennen, dass Frauen dort höhere Werte angeben als Männer [$t_{16}=1.44$; $p=.084$; n.s.], dies wird jedoch nicht signifikant. Eine einfaktorielle multivariate Varianzanalyse mit dem Faktor Geschlecht und den Werten der verschiedenen Fragebogenskalen als abhängige Variablen zeigte keine Effekte über alle Pbn auf ($F_8=2.24$; $p=.14$; $\eta^2=.716$), wengleich eine gewisse Tendenz zu erkennen war. Der Test der Zwischensubjekteffekte zeigte jedoch, dass der noch relativ kleine p-Wert ebenfalls vor allem auf signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen in der Einschätzung auf der Skala *sense of direction* beruhte [$F_1=5.26$; $p=.036$; $\eta^2=.247$].

Tab.21: Mittelwerte (und Standardabweichung) der Selbsteinschätzung der Strategien in den Strategiefragebögen nach Geschlechtern, sowie die t-Werte (mit Signifikanzwert p) zu den Geschlechtsunterschieden. Die Mittelwerte der signifikanten Unterschiede sind fett gedruckt. (SoD=*sense of direction*=Orientierungssinn).

Fragebogen	Subskala	Männer (n=11) M (SD)	Frauen (n=7) M (SD)	t-Wert des Mittelwertsvergleichs Männer - Frauen	p-Wert
Maze-Fragebogen	external	2.79 (.86)	3.48 (1.17)	-1.442	.084
	internal	3.73 (.99)	3.57 (.83)	.346	.365
Alltags- Strategieskala	Route	3.74 (.21)	3.61 (.46)	.823	.211
	Orientierung	2.66 (.57)	2.89 (.36)	-1.058	.177
dQSR (Fragebogen zu räuml. Repräsentationen) deutsche Faktoren	SoD	3.41 (.66)	2.74 (.50)	2.293	.018
	Überblick vs Landmarken	2.27 (.62)	2.14 (1.29)	.289	.388
	Richtungen	3.21 (.52)	2.76 (.60)	1.690	.055
	Routen (visuell vs verbal)	3.09 (.74)	3.64 (.99)	-1.360	.097
	Routen	3.41 (.97)	4.00 (.76)	-1.361	.096

In beiden Skalen des maze-Fragebogens unterschieden sich die beiden Strategiegruppen signifikant: Wer eine externe Strategie wählte schätzte sich auch signifikant höher auf der externalen Skala ein als Pbn mit einer internalen Strategie [$t_{16}=4.55$; $p=.000$; $d=2.40$], umgekehrt schätzten sich Pbn, die eine interne Strategie zeigten, signifikant höher auf der internalen Skala ein als die Externalen [$t_{16}=2.25$; $p=.02$; $d=1.05$].

Beide Strategiegruppen unterschieden sich ebenfalls auf der Routenstrategieskala der ASS. Externale Strategen schätzten sich auf dieser signifikant höher ein als interne [$t_{16}=2.03$; $p=.03$; $d=.95$]. Das ist konsistent mit der Korrelation zwischen der externalen Skala im maze-Fragebogen und dem Faktor *Routen* im dQSR (vgl. Tab.20). Allerdings unterschieden sich die beiden Strategiegruppen aus dem Labyrinth nicht in dem Faktor *Routen* des dQSR [$t_{16}=.649$; $p=.29$; n.s.] (vgl. Tab. 22).

Im Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (dQSR) unterschieden sich die beiden Strategiegruppen in ihrer Einschätzung bezüglich des Faktors *Überblick* [$t_{16}=2.27$; $p=.019$; $d=1.28$]: Internale schätzten sich hier signifikant höher ein als Externale. Ferner unterschieden sich beide Gruppen zumindest tendenziell in ihrer Einschätzung bezüglich ihres allgemeinen Orientierungssinns (*sense of direction*) [$t_5=1.17$; $p=.15$; n.s.], wieder schätzten sich die Internalen höher ein als die Externalen.

Tab.22: Mittelwerte (und Standardabweichungen) der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit der verwendeten Strategie im Virtuellen Labyrinth, sowie die t-Werte (mit Signifikanzwert p) zu den Unterschieden zwischen Pbn mit externaler und internaler Strategie im Labyrinth („Switcher“ sind nicht berücksichtigt) (N=18). Die Mittelwerte der signifikanten Unterschiede sind fett gedruckt. (SoD=*sense of direction*=Richtungssinn)

Fragebogen	Subskala	Externale (n=5) M (SD)	Internale (n=13) M (SD)	t-Wert des Mittelwertsvergleichs external – internal (df=16)	p-Wert
Maze-Fragebogen	external	4.13 (.69)	2.46 (.70)	4.548	.000
	internal	3.20 (1.07)	4.13 (.66)	-2.253	.02
Alltags-Strategieskala	Route	3.95 (.42)	3.61 (.28)	2.025	.03
	Orientierung	2.73 (.56)	3.08 (.51)	-1.275	.11
dQSR	SoD	2.71 (.96)	3.23 (.46)	-1.166	.15
	Überblick	1.60 (.65)	2.63 (.93)	-2.268	.019
(Fragebogen zu räuml. Repräsentationen) deutsche Faktoren	Richtungen	2.93 (.80)	3.15 (.52)	-.704	.246
	Routen (verbal)	3.20 (1.04)	3.19 (.83)	.016	.493
	Routen	3.80 (.57)	3.54 (1.13)	.649	.285

3.3.4 Aktivierungsdaten (fMRI-Daten)

3.3.4.1 Neuronales Korrelat der räumlichen Navigation

Es wurden für die Analyse der neuronalen Aktivierungsmuster nur die beiden mittels fMRI gemessenen Durchgänge, in denen tatsächlich navigiert werden musste, betrachtet (vgl. Abb.17). Diese beiden Durchgänge (D3 und D4, beziehungsweise letzter Lerndurchgang und Testdurchgang) wurden zunächst für die gesamte Gruppe (n=22) gegen die Baseline verglichen. Das bedeutet, man berechnet, in welchen Voxeln signifikante Signalunterschiede zwischen den beiden Navigationsbedingungen und der Ruhebedingung bestehen. Anschließend wurden diese beiden Durchgänge D3 und D4 gegen die Kontrollbedingung (Durchgang 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) verglichen. Das Testprinzip bleibt dabei prinzipiell das gleiche. Die aktivierten Areale inklusive der t-Werte und Signifikanzen finden sich detailliert in Tab. I und II in Anhang J und K.

Im Vergleich gegen die Baseline (FWE-korrigiert; $p < .05$; spatial extend²¹: 10 Voxel) wurden vor allem visuelle Areale im Okzipitallappen, vor allem die Gyri calcarini und lingualis, sowie Gyri occipitalis superior und medius aktiviert, sowohl primär (Brodmann-Areas 17 und 18), als auch sekundär, unter anderem das so genannte hOC5 (*human occipital cortex 5*), das in seiner Lage mit dem bewegungssensitiven Areal V5 korrespondiert. Kleinhirnbereiche auf der rechten Seite waren ebenfalls deutlich aktiv.

²¹ Spatial extend = räumlicher Schwellenwert, das heißt es wurden nur Bereiche als relevant aktiv klassifiziert, in denen mindestens 10 zusammenhängende Voxel einen signifikanten Signalanstieg zeigen.

Ferner gab es deutliche Aktivierungen im Cuneus (rechts) und im Präcuneus (bilateral). Weitere Aktivierungen fanden sich in primären somatosensorischen Arealen im superioren Parietallappen (bilateral) und inferior (nur links) und im Gyrus postcentralis, vor allem die Areas 1 und 2, aber auch die Area 3a. Zusätzlich dazu waren auch primäre motorische Areale (Area 4a und 4p) aktiv, vor allem im linken, aber auch im rechten präzentralen Gyrus, sowie auch prämotorische Areale (Area 6), wie zum Beispiel das so genannte SMA (*supplementary motor area*) im Gyrus frontalis superior (bilateral).

Im Temporallappen waren vor allem der linke Gyrus fusiformis und der rechte Gyrus temporalis medius (eventuell auch anteilig hOC5) aktiv. Dazu waren auch Teile des mittleren Cingulums, sowie der rechte Thalamus, das linke Putamen und das linke Operculum (OP1) aktiv (vgl. Abb. 22).

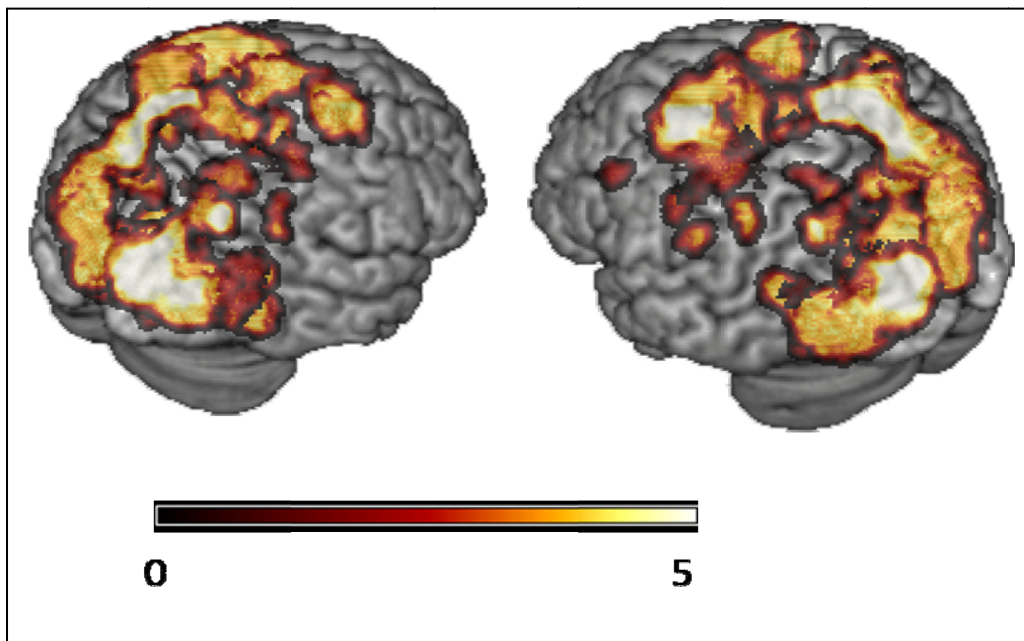


Abb. 22: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen Baseline über alle 22 Pbn (FWE-korrigiert $p=.05$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t -Werte an.

Im Vergleich gegen den Kontrolldurchgang (Durchgang 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) (unkorrigiert; $p<.01$; spatial extend: 10 Voxel) wurden noch immer visuelle Areale aktiv, nunmehr vor allem primär (Areas 17 und 18) auf beiden Seiten: die Gyri lingualis, der rechte Gyrus calcarinus, sowie der linke Gyrus occipitalis inferior und die Gyri occipitalis medii. Dazu wurden beide Cingula, sowohl die mittleren als auch die posterioren, aktiviert, sowie der Präcuneus (bilateral). Ferner zeigten sich der linke superioren Parietallappen, anteilig der hIP (*human intraparietal sulcus*), sowie der linke Gyrus angularis aktiviert (vgl. Abb. 23).

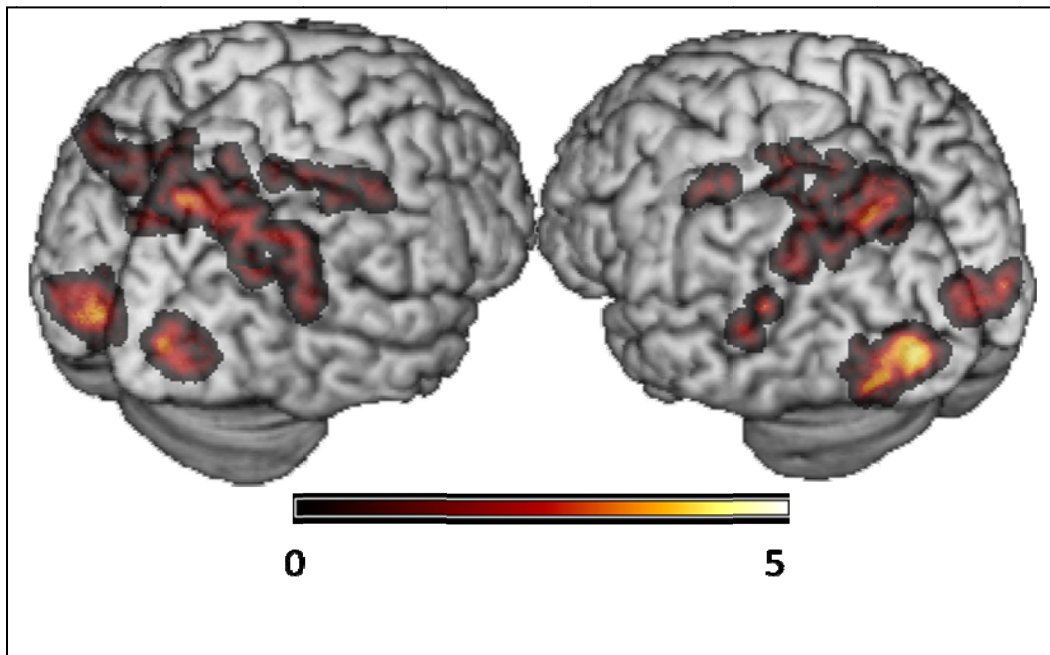


Abb. 23: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen die Kontrollbedingung D5 über alle 22 Pbn (unkorrigiert $p=.01$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t -Werte an.

3.3.4.2 Neuronale Aktivierungsmuster in Abhängigkeit vom Geschlecht

Die Haupteffekte nach Geschlechtern getrennt finden sich detailliert in den Tabellen III, IV, V und VI in Anhang L, M, N und O, sowie in den Abbildungen 24 und 25. Auch dort wurden die beiden Navigationsdurchgänge D3 und D4 sowohl gegen die Baseline als auch gegen die Kontrollbedingung verglichen, diesmal nach Geschlechtern getrennt.

Beim Vergleich von D3 und D4 gegen die Baseline (FWE-korrigiert; $p<.05$; spatial extend: 10 Voxel) zeigten sich bei den Männern ($n=11$) vor allem primäre visuelle Areale (Areas 17 und 18) im Okzipitallappen aktiv, vor allem die Gyri lingualis und calcarini, sowie Gyri occipitalis superior und medius. Kleinhirnbereiche auf beiden Seiten waren ebenfalls deutlich aktiv.

Ferner gab es deutliche Aktivierungen im rechten Cuneus und im Präcuneus (bilateral). Weitere Aktivierungen fanden sich in primären somatosensorischen Arealen im superioren Parietallappen (bilateral) und im linken Gyrus postcentralis, vor allem die Areas 1 und 2, aber auch die Area 3a. Zusätzlich dazu waren auch primäre motorische Areale (Area 4a und 4p) im linken präzentralen Gyrus aktiv, sowie auch prämotorische Areale (Area 6), wie das SMA (*supplementary motor area*) im linken Gyrus frontalis medius und im linken Gyrus paracentralis. Anders als in der Gesamtstichprobe war dazu zusätzlich noch der rechte Parahippocampus aktiviert.

Im Temporallappen waren vor allem der linke Gyrus fusiformis und der rechte Gyrus temporalis medius (evtl. auch anteilig hOC5) aktiv. Dazu fanden sich noch Aktivierungen im linken Thalamus.

Beim Vergleich von D3 und D4 gegen den Kontrolldurchgang (Durchgang 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) (unkorrigiert; $p < .01$; spatial extend: 10 Voxel) fand sich für Männer ($n=11$) eine Aktivierung im Bereich des rechten, sowie im linken Hippocampus und bilateral im mittleren, dazu im linken posterioren und im rechten anterioren Cingulum. Somatosensorisch zeigte sich noch eine Aktivierung im rechten Gyrus postcentralis (Area 3a). Schwache Aktivierungen fanden sich noch in primären visuellen Arealen (17 und 18), auf jeder Seite jeweils im Gyrus occipitalis medius bis hin in den linken Cuneus.

Dazu zeigten sich noch Aktivierungen im Präcuneus (bilateral) und im rechten Nucleus caudatus, sowie im rechten Gyrus frontalis inferior, dabei der Pars triangularis. Schließlich waren noch der rechte Gyrus temporalis superior und der linke Thalamus aktiviert (vgl. Abb. 24).

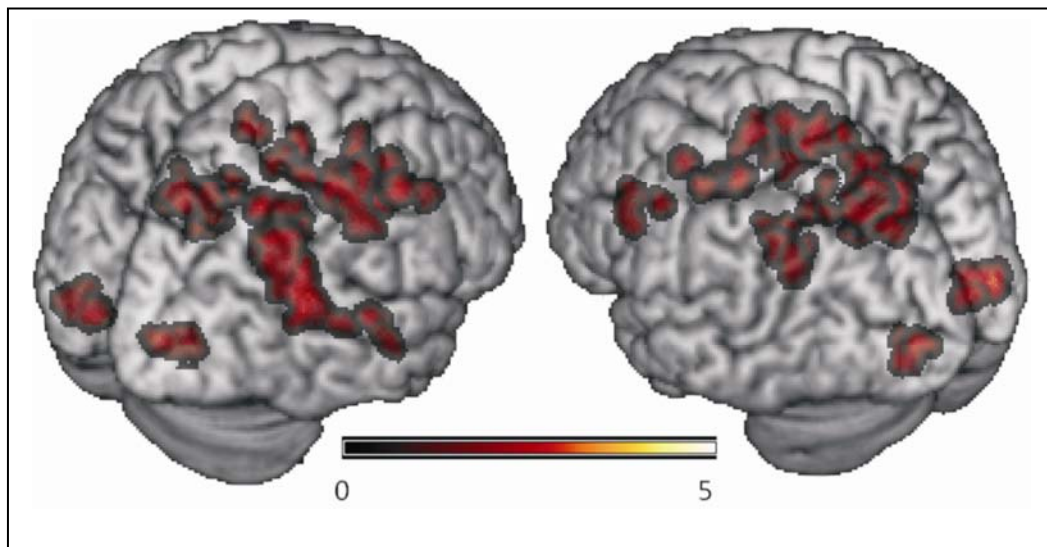


Abb. 24: Haupteffekt Männer: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen die Kontrollbedingung D5 über alle 11 Männer (unkorrigiert $p = .01$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t -Werte an.

Für die Frauen ($n=7$) fanden sich etwas andere Effekte: Beim Vergleich der Navigationsdurchgänge D3 und D4 gegen die Baseline (FWE-korrigiert; $p < .05$; spatial extend: 10 Voxel) wurden aber auch primäre visuelle Areale (Areas 17 und 18) im Okzipitallappen aktiv, vor allem die Gyri lingualis und calcarini auf beiden Seiten, sowie die Gyri occipitalis superior und medius (darin auch das hOC5), wie auch in beiden Gyri fusiformis. Das Kleinhirn war bei den Frauen jedoch nur rechts aktiv. Dazu gab es ebenfalls bilateral Aktivierungen im Cuneus und im Präcuneus. Somatosensorische

Areale wurden bei den Frauen auch aktiv: Der rechte Gyrus postcentralis mit Area 2 und der linke Gyrus postcentralis mit den Areas 1 und 2. Motorische Areale waren aktiv im linken Gyrus präcentralis (Areas 4a und 6) und im linken Gyrus frontalis superior (Area 6). Dazu war beidseitig noch der Lobulus parietalis superior aktiv, sowie der rechte Gyrus temporalis medius (darin evtl. hOC5).

Im Vergleich gegen den Kontrolldurchgang (Durchgang 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) (unkorrigiert; $p < .01$; spatial extend: 10 Voxel) fanden sich für die Frauen ($n=7$) vor allem in visuellen Bereichen (Areas 17 und 18) Aktivierungen, wie im Gyrus lingualis, im Gyrus calcarinus (jeweils auf beiden Seiten), sowie im linken Gyrus occipitalis inferior. Dazu fand sich nun eine Aktivierung im linken Cerebellum (während gegen Baseline das rechte aktiv war). Ferner waren das rechte posteriore Cingulum, der rechte Präcuneus und der rechte Gyrus fusiformis aktiv (vgl. Abb. 25).

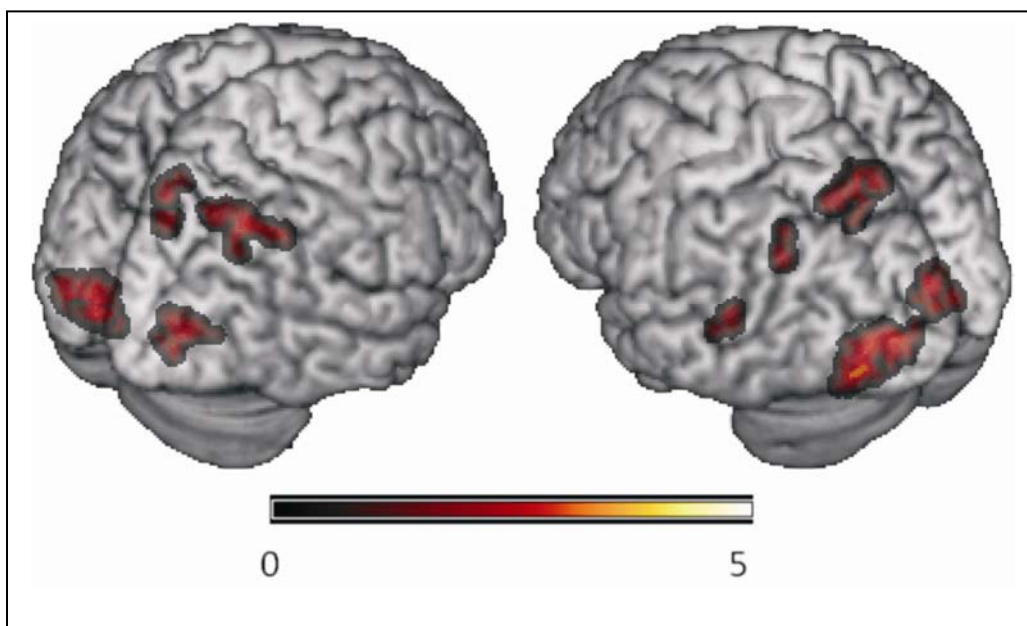


Abb. 25: Haupteffekt Frauen: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen die Kontrollbedingung D5 über alle 7 Frauen (unkorrigiert $p = .01$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t-Werte an.

Die Gruppenvergleiche wurden unkorrigiert ($p < .001$; spatial extend: 10 Voxel) gegeneinander gerechnet. Die Ergebnisse der Gruppenvergleiche Männer gegen Frauen und Frauen gegen Männer sind den Tabellen 23 und 24 zu entnehmen, sowie der Abbildung 26.

Hierbei wurden nur die beiden Navigationsbedingungen D3 und D4 gegeneinander verglichen, das heißt die Aktivierungen dieser beiden Durchgänge bei den Männern gewissermaßen von denen der Frauen abgezogen und vice versa.

Tab.23: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang), Männer > Frauen (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Männer, $p=.05$). $p=.001$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (24)	Lobulus parietalis superior (Präcuneus)	L		4.64	-11	-70	43	*

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von Eickhoff et al. (2005; 2007). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Männer zeigten demnach eine signifikant stärkere Aktivierung im linken superioren Parietallappen, vermutlich genauer im Präcuneus. Frauen zeigten demgegenüber eine signifikant stärkere Aktivierung im rechten superioren Parietallappen, sowie in rechten visuellen Arealen: im rechten Gyrus occipitalis medius, dem rechten Gyrus temporalis medius, darin enthalten vermutlich das hOC5 (sekundäres visuelles Areal, Bewegungswahrnehmung) und im rechten Gyrus lingualis, das heißt in der Area 17 (primäres visuelles Areal) (vgl. auch Abb. 26).

Tab.24: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang), Frauen > Männer (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Frauen, $p=.05$). $p=.001$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (45)	Lobulus parietalis superior	R		5.03	27	-70	54	*
	Gyrus occipitalis medius	R		3.89	32	-78	38	*
2 (13)	Gyrus temporalis medius	R	hOC5: 20% (10-20%)	3.85	49	-70	16	*
3 (11)	Gyrus lingualis	R	Area 17: 90% (70-100%)	3.95	5	-73	3	*

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von Eickhoff et al. (2005; 2007). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben

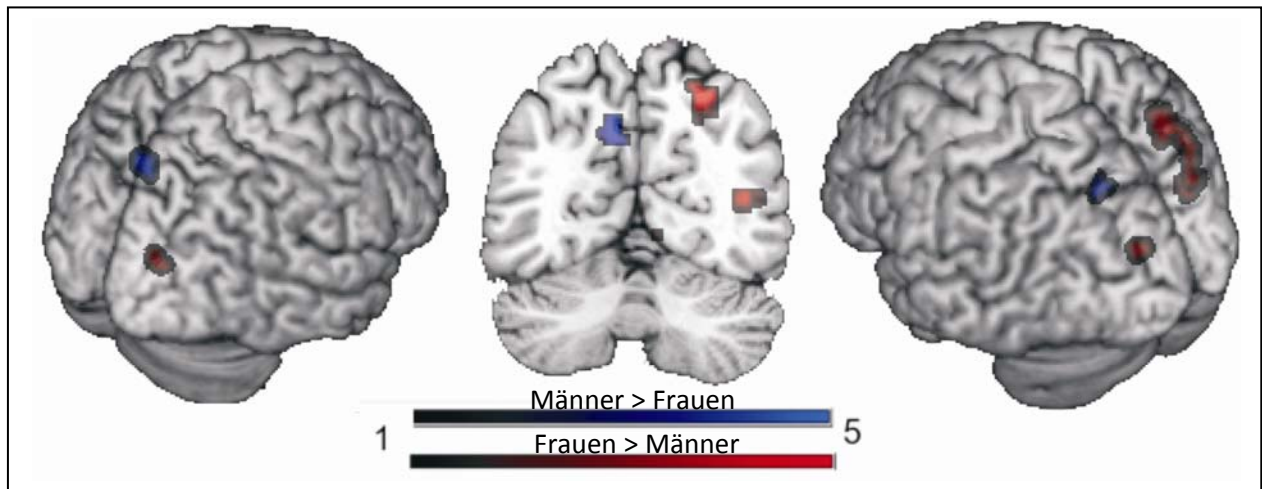


Abb. 26: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) nach Geschlechtern. Männer > Frauen (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Männer, $p=.05$): blau; Frauen > Männer (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Frauen), $p=.05$): rot (jeweils unkorrigiert $p=.001$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t-Werte an.

3.3.4.3 Neuronale Aktivierungsmuster in Abhängigkeit von der Strategiewahl

Die Haupteffekte der beiden Strategiegruppen (internal und external, „Switcher“ wurden nicht berücksichtigt) finden sich in den Tabellen VII, VIII, IX und X in Anhang P, Q, R und S, sowie in den Abbildungen 27 und 28. Für beide Gruppen wurden ebenfalls die Navigationsdurchgänge D3 und D4 gegen die Baseline und gegen die Kontrollgruppe verglichen.

Beim Vergleich der beiden Navigationsdurchgänge D3 und D4 gegen die Baseline (FWE-korrigiert; $p<.05$; spatial extend: 10 Voxel) zeigten sich bei Pbn mit externaler Strategie ($n=5$) vor allem primäre visuelle Areale (Areas 17 und 18) im Okzipitallappen aktiv, vor allem die Gyri lingualis und calcarini, sowie die Gyri occipitalis superior und medius. Dazu war der rechte Cuneus und der rechte Gyrus fusiformis aktiviert. Ferner waren Kleinhirnbereiche auf beiden Seiten deutlich aktiviert.

Weitere Aktivierungen fanden sich in primären somatosensorischen Arealen im superioren Parietallappen (bilateral) und im linken Gyrus postcentralis, vor allem Area 2. Zusätzlich dazu waren auch primäre motorische Areale (Area 4a) im linken präzentralen Gyrus aktiv, sowie auch prämotorische Areale (Area 6) im Gyrus frontalis superior auf beiden Seiten.

Beim Vergleich der Durchgänge D3 und D4 gegen den Kontrolldurchgang (D 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) (unkorrigiert; $p<.01$; spatial extend: 10 Voxel) fand sich für Pbn mit externaler Strategie ($n=5$) Aktivierung im visuellen Cortex (Areas 17 und vor allem 18), speziell im linken Gyrus occipitalis inferior

und medius, sowie im linken Gyrus lingualis, aber auch im rechten Gyrus occipitalis medius und im rechten Gyrus lingualis.

Dazu zeigten sich noch Aktivierungen im Präcuneus (bilateral) und im inferioren Parietallappen (bilateral), anteilig wahrscheinlich auch die hIP1 (**h**umanes **i**ntraparietales **A**real 1). Ferner gab es Aktivierung im rechten posterioren Cingulum, sowie im linken Cerebellum. Schließlich war der rechte Hippocampus klar aktiviert, während es beim linken Hippocampus nicht ganz so deutlich war (vgl. auch Abb. 27).

Bei Pbn mit internaler Strategie (n=10) zeigten sich beim Vergleich von D3 und D4 gegen die Baseline (FWE-korrigiert; $p < .05$; spatial extend: 10 Voxel) ebenfalls vor allem primäre visuelle Areale (Areas 17 und 18) im Okzipitallappen aktiv, vor allem die Gyri lingualis und calcarini, die Gyri occipitalis superior und medius, sowie sekundäre visuelle Areale wie eventuell das hOC5 im rechten Gyrus temporalis medius. Sowohl der rechte als auch der linke Gyrus fusiformis waren aktiv. Auch Kleinhirnbereiche auf beiden Seiten zeigten Aktivierung. Dazu zeigten sich bilaterale Aktivierungen im Cuneus und im Präcuneus.

Weitere Aktivierungen fanden sich in primären somatosensorischen Arealen im superioren Parietallappen (bilateral), im rechten Gyrus paracentralis und im linken, aber auch im rechten Gyrus postcentralis, besonders die Areas 1 und 2, aber auch die Areas 3a und 3b. Zusätzlich dazu waren auch primäre motorische Areale (Area 4p) im linken postzentralen Gyrus aktiv, sowie prämotorische Areale (Area 6), wie das SMA (*supplementary motor area*) im linken Gyrus frontalis medius und im linken Gyrus präcentralis, aber auch im rechten Gyrus frontalis superior. Dazu fanden sich noch Aktivierungen in den beiden Thalami, im rechten mittleren Cingulum und im Rolandischen Operculum (OP1).

Im Vergleich der beiden Navigationsdurchgänge D3 und D4 gegen den Kontrolldurchgang (D 5, Laufen auf einem weißen Strich am Boden des Labyrinths) (unkorrigiert, $p < .01$; spatial extend: 10 Voxel) fanden sich für Pbn mit internaler Strategie (n=10) vor allem Aktivierungen in primären visuellen Arealen (Areas 17 und 18), genauer in den Gyri lingualis und im rechten Gyrus calcarinus, sowie im linken Gyrus occipitalis inferior und medius. Dazu fand sich noch Aktivierung im linken Gyrus fusiformis. Weitere Aktivierungen fanden sich im linken anterioren Cingulum, Gyrus angularis und im superioren Parietallappen (vgl. Abb. 28).

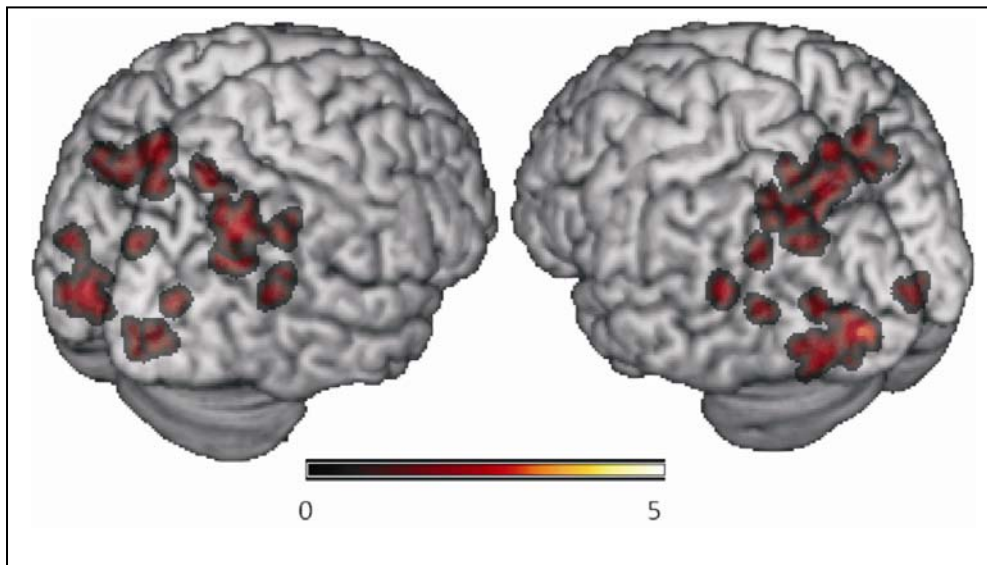


Abb. 27: Haupteffekt externe Strategie: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen die Kontrollbedingung D5 über alle 5 Pbn mit externaler Strategie (unkorrigiert $p=.01$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t-Werte an.

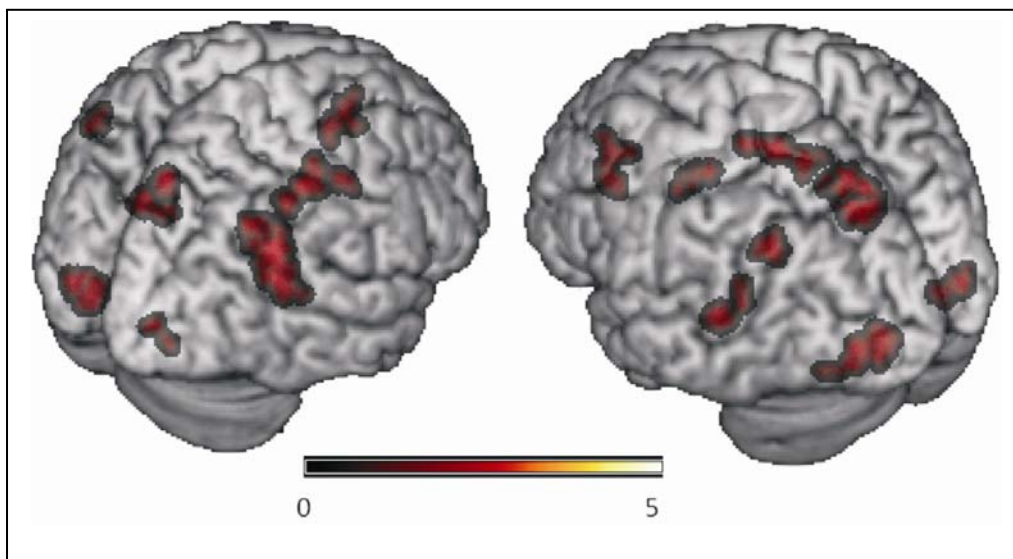


Abb. 28: Haupteffekt interne Strategie: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen die Kontrollbedingung D5 über alle 13 Pbn mit interner Strategie (unkorrigiert $p=.01$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t-Werte an.

Die Gruppenvergleiche wurden unkorrigiert ($p<.001$; spatial extend) gegeneinander gerechnet. Die Ergebnisse der Gruppenvergleiche externe Strategie gegen interne Strategie und interne Strategie gegen externe Strategie sind den Tabellen 25 und 26 zu entnehmen, sowie Abbildung 29. Hierbei wurden wie schon beim Geschlechtervergleich nur die beiden Navigationsbedingungen D3 und D4 gegeneinander verglichen, also gewissermaßen die Aktivierungen dieser beiden Durchgänge bei den Externalen von denen der Internalen abgezogen und umgekehrt.

Tab.25: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang), Externale Strategie > Internale Strategie (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Externale Strategie, $p=.05$). $p=.001$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p <.001$; ** FDR $p<.05$; *** FWE $p <.05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (20)	Cuneus	R	Area 18: 90% (80-90%)	4.39	5	-86	19	*
2 (19)	Cerebellum	L		5.22	-19	-73	-19	*

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von Eickhoff et al. (2005; 2007). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Tab.26: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang), Internale Strategie > Externale Strategie (maskiert mit dem Haupteffekt (t-Test gegen Baseline) für Internale Strategie, $p=.05$). $p=.001$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p <.001$; ** FDR $p<.05$; *** FWE $p <.05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Cluster (Größe in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
1 (29)	Gyrus postcentralis	L	Area 1	5.04	-51	-13	57	*
2 (14)	Mittleres Cingulum	R	Area 6: 10% (0-20%)	4.57	14	-16	46	*

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von Eickhoff et al. (2005; 2007). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Demnach waren bei Pbn mit externaler Strategie der rechte Cuneus und das linke Cerebellum signifikant stärker aktiv als bei Pbn mit internaler Strategie (vgl. Tab. 25). Allerdings ist die Bezeichnung Cuneus in diesem Zusammenhang irreführend: Laut der Anatomy Tool Box in SPM 5 ist wahrscheinlich eher das primäre visuelle Areal, also die Area 18, das aktivierte. Bei Pbn mit internaler Strategie waren dagegen mehr Aktivierungen als bei Pbn mit externaler Strategie in der somatosensorischen Area 1 (links) und dem rechten mittleren Cingulum zu finden.

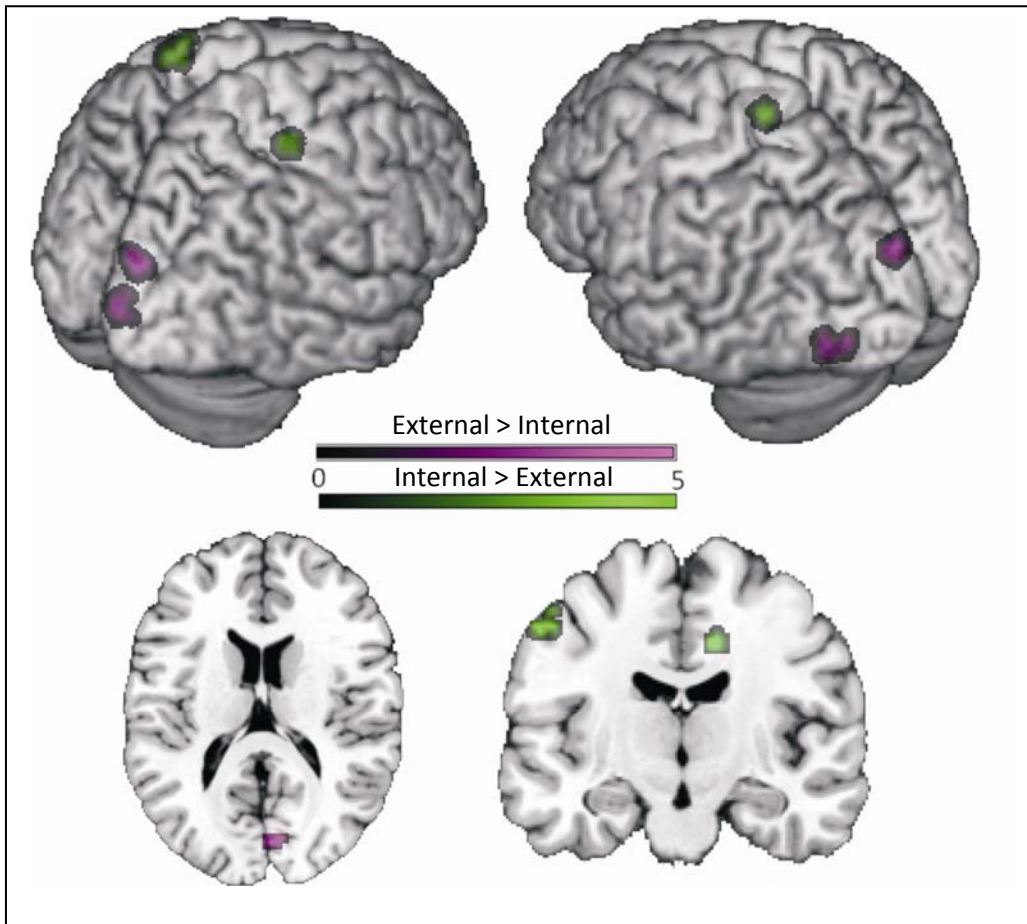


Abb. 29: Neuronale Aktivierungen in den Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) nach Strategietypen. External > Internal: violett; Internal > External: grün (unkorrigiert $p=.001$). Search Depth: 12 Voxel. Der Balken gibt die Größe der t-Werte an.

3.3.4.4 Einfluss der Sexualhormone auf die neuronalen Aktivierungen

Zunächst wurde in SPM 5 eine multiple Regression mit den z-standardisierten Serumwerten der Sexualhormone als Kovariaten durchgeführt, um Cluster zu identifizieren, in denen die Sexualhormone einen signifikanten Effekt auf die neuronale Aktivierung haben. Dies geschah nach Geschlechtern getrennt, da anzunehmen war, dass das männliche Hormon Testosteron in der Gruppe der Männer die größte Streuung aufweist, die weiblichen Hormone Östrogen und Progesteron dagegen in der Gruppe der Frauen. Somit wurde bei den Männern nur Testosteron als Kovariate eingeführt, bei den Frauen Östrogen und Progesteron.

In beiden Regressionen wurde der interessierende F-Kontrast (*effect of interest*), in den die Einzelkontrastbilder (con-images) des Kontrasts D3-D4 versus D5 eingehen, durch den Haupteffekt (t-Test: D3-D4 vs D5) maskiert (inklusive, $p<.01$). Es wurden im Folgenden nur Bereiche, so genannte *volumes of interests* (VOI), mit einem Signifikanzniveau von $p<.05$ berücksichtigt. So konnten diejenigen Gehirnareale

spezifiziert werden, in denen es aufgrund der Kovariaten zu relevanten Effekten in der neuronalen Aktivierung kam.

Es wurden für die Frauen auf diese Weise zwei relevante VOIs ermittelt, das heißt Areale, in denen die Kovariaten einen signifikanten Einfluss auf die Aktivierung haben. Das erste VOI befand sich im linken Gyrus occipitalis inferior und medius und das zweite im linken Gyrus postcentralis, beziehungsweise Operculum.

Für die Männer wurden sieben VOIs ermittelt: 1. ein Cluster mit dem linken Gyrus occipitalis medius und inferior, sowie dem linken Gyrus calcarinus, der Einfachheit im Folgenden mit linkem visuellen Cortex beschrieben, 2. ein Cluster mit dem rechten Gyrus occipitalis medius, dem Gyrus calcarinus und dem rechten Cuneus (im Folgenden: rechter visueller Cortex/Cuneus), 3. ein kleines Cluster im linken Hippocampus, 4. ein etwas größeres Cluster im linken Hippocampus, 5. ein Cluster im rechten mittleren Cingulum, 6. ein Cluster im Thalamus und 7. ein Cluster, das mit einer geringen Wahrscheinlichkeit im rechten Hippocampus angesiedelt.

Für jedes der ermittelten VOIs wurden Eigenvariante für jeden Pb ermittelt, die ein standardisiertes Maß für das Ausmaß der neuronalen Aktivierung in dem betreffenden neuronalen Areal darstellt. Für diese Eigenvarianten als Kriterium und die z-standardisierten Hormonwerte als Prädiktoren wurden nun die Regressionsgleichungen bestimmt.

Für die Frauen (n=7, vgl. Tab.27) ergab sich in dem ersten Cluster im linken Gyrus occipitalis inferior und medius folgende geschätzte Regressionsgleichung:

$$(1) \quad EV_{\text{VOI1F}} = 0,551 - 5,83 * \ddot{O} + 2,91 * P$$

EV_{VOI1F} =Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im ersten VOI der Frauen (linker Gyrus occipitalis inferior und medius)

\ddot{O} = z-standardisierte Menge an Serums-Östrogen

P = z-standardisierte Menge an Serums-Progesteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte (*goodness of fit*) von $R^2=.98$ auf. Der F-Test wird mit $F_{(6)}=99.31$ ($p<.000$) signifikant, so dass die b-Koeffizienten als signifikant von Null verschieden angenommen werden können.

Für das zweite VOI der Frauen (linker Gyrus postcentralis, Operculum) wurde folgende Regressionsgleichung geschätzt:

$$(2) \quad EV_{\text{VOI2F}} = 0,551 - 5,52 * \ddot{O} + 1,66 * P$$

EV_{VOI2F} =Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im zweiten VOI der Frauen (linker Gyrus postcentralis / Operculum)

\ddot{O} = z-standardisierte Menge an Serums-Östrogen

P = z-standardisierte Menge an Serums-Progesteron

Diese Regressionsfunktion weist ebenfalls eine Güte von $R^2=.98$ auf. Der F-Test wird mit $F_{(6)}=56.31$ ($p<.001$) auch signifikant, so dass die b-Gewichte erneut als signifikant von Null verschieden angenommen werden können. Das bedeutet, dass in beiden für die Frauen relevanten Clustern Östrogen einen negativen, Progesteron dagegen einen eher positiven Einfluss auf die neuronale Aktivierung hat.

Tab.27: Ergebnisse der Regressionsanalyse für jedes VOI (*volume of interest*) der Frauen ($n=7$) mit den Regressoren Östrogen und Progesteron: geschätzte Regressionskoeffizienten b, dessen Signifikanz (t-Test) sowie dem multiplen Korrelationskoeffizienten R und dem Bestimmtheitsmaß R^2 . Daneben das Ergebnis des F-Tests, ob die ermittelten b-Werte von 0 verschieden sind. EV=Eigenvariante

VOI	Regressoren	b-Gewichte	sign.	R	R^2	F	p
Cluster im linken Gyrus occipitalis inferior und medius (16 Voxel = 43 mm ³) MNI (Maximum): x= -59 y=-13 z=27	Östrogen	- 5,83	.000	.99	.98	99.31	.000
	Progesteron	2,91	.000				
Cluster im linken Gyrus postcentralis, Operculum (33 Voxel = 89 mm ³) MNI (Maximum): x= -27 y=-76 z=-3	Östrogen	- 5,52	.001	.97	.98	56.31	.001
	Progesteron	1,66	.006				

Für die Männer ($n=11$, vgl. Tab.28) ergab sich in deren erstem Cluster im linken visuellen Cortex folgende geschätzte Regressionsgleichung:

$$(3) \quad EV_{\text{VOI1M}} = -5,07 + 5,41 * T$$

EV_{VOI1M} = Eigenvariante (~ neuronale Aktivierung) im ersten VOI der Männer (linker visueller Cortex)

T= z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2=.886$ auf und der F-Test wird mit $F_{(10)}= 69.87$ ($p<.001$) sehr signifikant.

Im zweiten Cluster der Männer, dem rechten visuellen Cortex mit Cuneus, ergab sich folgende geschätzte Regressionsgleichung:

$$(4) \quad EV_{\text{VOI2M}} = -4,74 + 5,07 * T$$

EV_{VOI2M} = Eigenvariante (~ neuronale Aktivierung) im zweiten VOI der Männer (rechter visueller Cortex, Cuneus)

T= z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2=.824$ auf und das Modell erweist sich mit einem $F_{(10)}$ -Wert von 42.16 ($p<.001$) als höchstwahrscheinlich gültig. In

beiden visuellen Cortices hat Testosteron somit einen positiven Einfluss auf die neuronale Aktivierung.

Im dritten Cluster der Männer, im linken Hippocampus, wurde folgende Regressionsgleichung geschätzt:

$$(5) \quad EV_{\text{VOI3M}} = 2,70 - 2,89 * T$$

EV_{VOI3M} = Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im dritten VOI der Männer (linker Hippocampus)

T = z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2 = .856$ auf und erweist sich mit $F_{(10)} = 53.40$ ($p < .001$) als höchstwahrscheinlich gültig.

Im vierten Cluster der Männer, ebenfalls noch linker Hippocampus, ergab sich folgende geschätzte Regressionsgleichung:

$$(6) \quad EV_{\text{VOI4M}} = 3,65 - 3,90 * T$$

EV_{VOI4M} = Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im vierten VOI der Männer (linker Hippocampus)

T = z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2 = .801$ auf und der F-Test wird mit $F_{(10)} = 36.25$ ($p < .001$) sehr signifikant.

Für das fünfte Cluster im rechten mittleren Cingulum der Männer wurde folgende Regressionsgleichung geschätzt:

$$(7) \quad EV_{\text{VOI5M}} = 4,94 - 5,28 * T$$

EV_{VOI5M} = Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im fünften VOI der Männer (rechtes mittleres Cingulum)

T = z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2 = .739$ auf und der F-Test wird mit $F_{(10)} = 25.55$ ($p < .01$) ebenfalls sehr signifikant.

Im sechsten Cluster der Männer, dem Thalamus auf beiden Seiten, wurde folgende Regressionsgleichung geschätzt:

$$(8) \quad EV_{\text{VOI6M}} = 3,14 - 3,36 * T$$

EV_{VOI6M} = Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im sechsten VOI der Männer (Thalamus)

T = z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2 = .693$ auf und erweist sich mit $F_{(10)} = 20.32$ ($p < .01$) als höchstwahrscheinlich gültig.

Tab.28: Ergebnisse der Regressionsanalyse für jedes VOI (*volume of interest*) der Männer (n=11) mit dem Regressor Testosteron: geschätzte Regressionskoeffizienten b, deren Signifikanz (t-Test), sowie dem multiplen Korrelationskoeffizienten R und dem Bestimmtheitsmaß R². Daneben das Ergebnis des F-Tests, ob die ermittelten b-Werte von 0 verschieden sind. EV=Eigenvariante

VOI	Regressor	b-Gewicht	sign.	R	R ²	F	p
Cluster im linken visuellen Cortex (103 vx = 278 mm ³) MNI (Maximum): x= -22 y=-92 z=3	Testosteron	5,41	.000	.941	.886	69.87	.000
Cluster im rechten visuellen Cortex/Cuneus (119 vx = 321 mm ³) MNI (Maximum): x=22 y=-86 z=3	Testosteron	5,07	.000	.908	.824	42.16	.000
Cluster im linken Hippocampus (10 vx = 27 mm ³) MNI (Maximum): x=-30 y=-40 z=0	Testosteron	- 2,89	.000	.925	.856	53.40	.000
Cluster im linken Hippocampus (24 vx = 65 mm ³) MNI (Maximum): x=-24 y=-43 z=8	Testosteron	- 3,90	.000	.895	.801	36.25	.000
Cluster im rechten mittleren Cingulum (19 vx = 51 mm ³) MNI (Maximum): x=11 y=-5 z=32	Testosteron	- 5,28	.001	.860	.739	25.55	.001
Cluster im Thalamus (14vx = 38mm ³) MNI (Maximum): x=3 y=-16 z=8	Testosteron	- 3,36	.001	.832	.693	20.32	.001
Cluster im rechten Hippocampus/WM (36 vx = 97 mm ³) MNI (Maximum): x=35 y=-38 z=0	Testosteron	- 2,18	.004	.792	.627	15.15	.004

Das siebte Cluster der Männer ist bezüglich einer Interpretation mit Vorsicht zu genießen, da es nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit in den rechten Hippocampus hineinragt und wahrscheinlich weiße Substanz abbildet. Für dieses letzte Cluster der Männer wurde folgende Regressionsgleichung geschätzt:

$$(9) \quad EV_{\text{VOI7M}} = 2,04 - 2,18 * T$$

EV_{VOI7M} = Eigenvariante (\sim neuronale Aktivierung) im siebten VOI der Männer (evtl. rechter Hippocampus, WM)

T = z-standardisierte Menge an Serums-Testosteron

Diese Regressionsfunktion weist eine Güte von $R^2 = .627$ auf und der F-Test wird mit $F_{(10)} = 15.15$ ($p < .01$) auch sehr signifikant.

In diesen letzten VOIs, bzw. Clustern (Hippocampus, Thalamus und Cingulum) ist der Zusammenhang der neuronalen Aktivierung mit Testosteron negativ, d.h. je mehr Testosteron im Blut, desto geringer die neuronale Aktivierung in den betreffenden Arealen.

3.3.5 Ergebniszusammenfassung

Die Verteilung der Sexualhormone innerhalb der Geschlechter entspricht weitestgehend den Normwerten und die Werte für die Sexualhormone in Speichel und Serum korrelieren hoch positiv miteinander.

Die Anzahl der Fehler korreliert positiv mit Östrogen- und Progesteronspiegel, gemessen durch das Serum. Das heißt, je höher Östrogen und Progesteron im Blut konzentriert waren, desto mehr Fehler wurden im virtuellen Labyrinth gemacht. Für Testosteron fand sich kein solcher Zusammenhang. Männer erbrachten nur tendenziell bessere Leistungen im Virtuellen Labyrinth als Frauen. Es zeigte sich ebenso kein Geschlechtsunterschied in der richtigen Wiedergabe des Labyrinthgrundrisses. Für die Strategiewahl konnte in dieser Studie kein Zusammenhang mit Geschlecht oder Sexualhormonkonzentration gefunden werden. Männer und Frauen etwa wählten gleich häufig eine externe oder eine interne Navigationsstrategie.

Die interne Skala des maze-Fragebogens korreliert positiv mit der Skala Orientierungsstrategie der ASS. Die externe Skala korreliert positiv mit dem Faktor Routen des QSR und negativ mit dem Faktor Überblick.

Männer schätzten sich signifikant höher als Frauen auf der Skala *Sense of Direction* (Allgemeine Orientierungsfähigkeit) des dQSR ein. Pbn mit externaler Strategie wiesen höhere Werte als Pbn mit internaler Strategie auf der externalen Skala des maze-FB und der Routenskala der ASS auf. Pbn mit internaler Strategie schätzten sich dagegen höher als Pbn mit externaler Strategie auf der internalen Skala des maze-FB und der Skala Überblick des dQSR ein.

Es finden sich insgesamt über alle Pbn vergleichbare neuronale Areale aktiviert wie in anderen Studien zur räumlichen Navigation. Männer zeigten mehr neuronale

Aktivierungen als Frauen im linken Präcuneus. Frauen zeigten mehr neuronale Aktivierung als Männer in den rechtsseitigen Arealen Lobulus parietalis superior, Gyrus occipitalis medius, Gyrus temporalis medius (hOC5) und Gyrus lingualis (Area 17).

Pbn mit externaler Strategie zeigten mehr neuronale Aktivierungen als Pbn mit internaler Strategie in rechten visuellen Arealen und im linken Cerebellum. Pbn mit internaler Strategie zeigten mehr neuronale Aktivierungen als Pbn mit externaler Strategie im linken somatosensorischen Cortex und im rechten Cingulum.

Östrogen und Progesteron korreliert bei Frauen positiv mit neuronalen Aktivierungen in linken visuellen Arealen. Bei Männern findet sich eine negative Korrelation zwischen Testosteron und den neuronalen Aktivierungen im Hippocampus und eine positive vor allem in visuellen Arealen.

3.4 Diskussion

Ziel dieser Studie war die Untersuchung neuronaler Unterschiede während räumlicher Navigation in Abhängigkeit von Geschlecht und vor allem präferierter Navigationsstrategie, sowie der Modulation der neuronalen Aktivierungen durch Sexualhormone. Zudem wurden aber auch Leistungsunterschiede untersucht.

Bezüglich der Leistungen im Labyrinth fand sich allenfalls ein tendenzieller Geschlechtseffekt: Insgesamt machten sehr wenige Pbn überhaupt Fehler. Zu denen, die Fehler machten, gehörten aber öfter Frauen (5 von 7 \pm 71 %) als Männer (3 von 11 \pm 27%). Insgesamt machten Frauen mehr Fehler und brauchten länger, um durch das Labyrinth hindurch zu laufen. Dies ist aber kein statistisch relevanter Effekt und in der ersten Studie zeigte sich das nicht. Wie bereits in Abschnitt 2.4 muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass das Labyrinth nicht zur Leistungsmessung, sondern zur Strategiedifferenzierung gedacht war und darum ein relativ leichtes Paradigma darstellt. Somit ist es hier zu Deckeneffekten gekommen, das heißt insgesamt wurden kaum Fehler gemacht. Darum kann eine echte Aussage bezüglich der Leistungsunterschiede von Männern und Frauen mithilfe dieses Paradigmas nicht getroffen werden. Dennoch ist es bemerkenswert, dass es trotz dieser Einschränkung und trotz der geringen Stichprobengröße zu gewissen Unterschieden zugunsten der Männer kommt.

Dies wird noch dadurch verstärkt, dass sich ein positiver Zusammenhang zwischen den Fehlern im Labyrinth und den weiblichen Sexualhormonen im Serum zeigt. Mehr Östrogen und Progesteron im Blut geht mit mehr Fehlern im Labyrinth einher, unabhängig vom Geschlecht. Dieser Zusammenhang ist besonders bemerkenswert, da sowieso recht wenige Fehler im Labyrinth gemacht wurden, diese aber offenbar vor allem von Pbn mit viel „weiblichen“ Hormonen. Demgegenüber zeigte sich zwar kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Fehlern im Labyrinth und dem Testosteronspiegel im Serum, aber eine leichte Tendenz zu einem negativen Zusammenhang. Dies ist prinzipiell konsistent mit der ersten Studie, sowie mit anderen Studien, die – allerdings nur tierexperimentell – zeigten, dass schlechtere Leistungen im Morris-Wasserlabyrinth (MWM) mit hohen Östradiolspiegeln zusammenhängen (Galea et al., 1995; Snihur et al., 2008; Rissanen et al., 1999) und dass der Progesteron-Metabolit Allopregnanolon ebenfalls die Leistung im MWM vermindert (Johansson et al., 2002). Auch der negative Zusammenhang zwischen Fehlern und Testosteron ist vereinbar mit anderen Studien (Burkitt et al., 2007; Driscoll et al., 2005), auch wenn dieser hier nicht signifikant wurde.

Obwohl also das Labyrinth nicht zur Leistungserfassung gedacht und prinzipiell auch eher nicht dafür geeignet ist, zeigen sich dennoch gewisse Effekte. Für die weitere Vertiefung bezüglich der Effekte von Geschlecht und Sexualhormonen auf Navigationsleistungen wäre ein schwierigeres Labyrinth zu präferieren. In dieser und der vorhergehenden Studie ging es aber primär um den Einfluss von Geschlecht und Sexualhormonen auf die verwendeten Strategien im virtuellen Labyrinth.

Bei der Untersuchung dieser Strategien ist kritisch anzumerken, dass von den 22 Pbn lediglich fünf eindeutig eine externale Strategie gewählt haben. Levy und Kollegen (2005) berichten ebenfalls, dass in ihrer Studie eine interne Strategie deutlich häufiger gewählt wurde als eine externe. Offenbar wird im virtuellen Labyrinth generell eine interne Strategie einer externen vorgezogen. Dies ist für die gesamte Interpretation aller Gruppenunterschiede als problematisch anzusehen. Dennoch lässt sich festhalten, dass sich die tendenziellen Ergebnisse im Großen und Ganzen mit denen der ersten Studie decken, sowohl in den Leistungen als auch bezüglich zum Beispiel des Zusammenhangs von Navigationsstrategien im virtuellen Labyrinth und den Fragebogendaten: Wer zum Beispiel eher eine interne Strategie präferierte, schätzte sich höher auf der Skala Orientierungsstrategie der ASS ein.

Ferner fanden sich positive Zusammenhänge zwischen der Skala „external“ im maze-Fragebogen (maze-FB) und den Routenskalen im Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (dQSR) und negative mit der Skala „Überblick versus Landmarken“. Das heißt, Pbn, die im maze-FB angaben, eine externe Strategie verwendet zu haben, schätzten sich auf den Routenskalen des dQSR höher ein als Pbn mit interner Strategie und nutzten eher Landmarkenstrategien als Überblickswissen. Zudem schätzten sich Pbn, die verhaltensexperimentell als „Externale“ klassifiziert wurden, höher als Internale auf der Routenstrategie der Alltags-Strategie-Skala (ASS) ein und niedriger auf der Überblicksskala des dQSR. Die dabei gefundenen Effektgrößen sind akzeptabel, was angesichts der kleinen Stichprobe wiederum ein Zeichen dafür ist, dass die Ergebnisse durchaus interpretierbar sind.

Routenstrategien im Fragebogen hängen somit nicht mit der angeblichen Routenstrategie „interne Strategie“ zusammen, sondern mit der vermeintlich allozentrischen Strategie „externe Strategie“, die außerdem mit einer Landmarkenstrategie zusammenhängt. Die vermeintlich egozentrische, interne Strategie hängt dagegen mit einer Überblicksstrategie im Fragebogen zusammen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der ersten Studie, in der sich bereits andeutete, dass die Interpretation wie sie von zum Beispiel Etchamendy und Bohbot (2007), Iaria et al.

(2003), Korol (2004) und anderen gemacht wird, nicht haltbar ist, nämlich dass eine externale Strategie eine allozentrische, räumliche und eine internale eine egozentrische, nicht-räumliche Reiz-Reaktionsstrategie darstellt. Darauf wird in der letzten Studie dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 4) noch weiter eingegangen werden.

Die neuronalen Aktivierungen der Navigationsbedingungen D3 und D4 decken sich in weiten Teilen mit denen anderer Studien. So fanden sich neben primären und sekundären visuellen Arealen Aktivierungen im rechten Cerebellum, im rechten Cuneus, beidseitig Präcuneus, in anderen parietalen Arealen, zum Beispiel der hIP und dem Gyrus angularis, allerdings verstärkt links, im Cingulum, im SMA und im linken Putamen (Basalganglien). Dazu fanden sich Aktivierungen in eher selten berichteten Arealen wie somatosensorische Bereiche und dem linken Operculum.

Innerhalb der visuellen Areale waren vor allem die Gyri lingualis aktiviert. Diese sind Teil des ventralen Pfades („Was“-Bahn), der an der Objekterkennung beteiligt ist (vgl. z.B. Mishkin, Ungerleider, & Macko, 1983). Es ist recht einleuchtend, dass die Aktivierung der lingualen Gyri die Wiedererkennung der Landmarken und bestimmter Abzweigungen widerspiegelt. Tatsächlich zeigt sich, dass es bei Schädigung des Gyrus lingualis zu einer Landmarkenagnosie kommt. Die Patienten können dann zwar zum Beispiel ein Haus noch als ein Haus erkennen, dieses aber nicht als Landmarke zur Orientierung nutzen (vgl. Kolb & Wishaw, 2003).

Die Aktivierung des Parietallappens ist konsistent mit anderen Studien (vgl. z.B. Burgess et al., 1999b; Hartley et al., 2003b), ebenso die Cingulumaktivität (vgl. z.B. Maguire et al., 1999) und die des medialen Temporallappens, normalerweise allerdings eher Hippocampus und Parahippocampus. Es mag erstaunen, dass in dieser Studie der Hippocampus über alle Probanden betrachtet keine signifikante Aktivierung aufweist, obwohl er immer wieder als ein wichtiger Teil räumlicher, vor allem allozentrischer Navigationsprozesse angesehen wird. Wenn man die Daten getrennt nach den Geschlechtern auswertet, zeigt sich aber, dass bei den Männern eine deutliche Hippocampusaktivierung zu verzeichnen ist, während diese bei den Frauen so nicht zu finden ist. Über die Gesamtgruppe wird die Aktivierung des Hippocampus deswegen womöglich nicht signifikant, weil die Frauen den Effekt „verwässern“. Ferner wird aktuell auch oft davon ausgegangen, dass der Hippocampus eher indirekt an Gedächtnisprozessen und Navigation beteiligt ist (vgl. z.B. Rolls & Kesner, 2006).

Die Basalganglien werden auch oft im Zusammenhang mit räumlicher Navigation berichtet (z.B. Hartley et al., 2003b), wobei dabei dann eher der Nucleus caudatus oder das Striatum als relevant betrachtet werden, während hier vor allem das

Putamen neuronale Aktivierung aufwies. Dies wird aber auch nicht immer ganz abgetrennt von etwa dem Nucleus caudatus betrachtet, insofern als dass bei Läsionsstudien zur räumlichen Navigation bei Nagern nicht zwischen einer Putamen- oder Caudatusläsion unterschieden wird (z.B. Devan, Goad, & Petri, 1996; Oliveira, Bueno, Pomarico, & Gugliano, 1997). Somit kann die Aktivierung des Putamens durchaus in den Gesamtzusammenhang gebracht werden und als konsistent mit den Ergebnissen anderer Studien betrachtet werden. In diesen werden die Basalganglien in der Regel für automatisierte Bewegungsabfolgen wie etwa beim Ablaufen einer Route berichtet.

In einigen Studien wurden auch prämotorische Areale gefunden. Malouin, Richards, Jackson, Dumas und Doyon (2003) fanden zum Beispiel für die Repräsentation von Hindernissen und ihrer Lokation relativ zur eigenen Person ein distinktes neuronales Netzwerk, das neben dem Präcuneus und dem rechten Parietalcortex auch das linke supplementär-motorische Areal (SMA) beinhaltet.

In Übereinstimmung mit diesen Studien wurde in der vorliegenden Arbeit ebenfalls eine Aktivierung des SMA während der Navigationsaufgaben gefunden. Das SMA spielt eine Rolle beim Erlernen von Handlungsabfolgen (vgl. z.B. Halsband & Lange, 2006): Versuche an Affen zeigten, dass die vorübergehende Blockade der SMA zur Unfähigkeit führt, Bewegungen zu initiieren (Kermadi, Liu, Tempini, & Rouiller, 1997). Das Erlernen eines Weges, auch auf motorischer Ebene mit den entsprechenden Joystickbewegungen, ist eine solche Handlungsabfolge und es ist deshalb sehr plausibel, dass es in den entsprechenden Arealen zu Aktivierungen während räumlicher Navigation kommt.

Männer zeigten im Gegensatz zu Frauen neuronale Aktivierungen beidseitig in Hippocampus, im rechten Nucleus caudatus und in somatosensorischen Arealen, sowie im linken Thalamus. Der rechte Hippocampus gilt als Ort der kognitiven Landkarte und einer allozentrischen räumlichen Repräsentation. Da man davon ausgeht, dass Männer eher allozentrische Strategien verwenden (z.B. Maguire et al., 1999), ist es nachvollziehbar, dass vor allem bei Männern eine Hippocampusaktivierung gefunden wird, nicht aber bei Frauen. Der linke Hippocampus wird dagegen eher mit episodischem Gedächtnis assoziiert. Grön et al. (2000) fanden in ihrer Studie bei Männern ebenfalls eine stärkere Aktivierung des linken Hippocampus und interpretierten dies dahingehend, dass Männer episodische Informationen in ihren Navigationsprozess einbeziehen. Die Einbeziehung des episodischen Gedächtnis lässt eine eher egozentrische Verarbeitung der Informationen vermuten., da episodische

Informationen wahrscheinlich eher egozentrisch gespeichert werden, zumindest aber hoch subjektiv. Damit zusammenhängend wäre auch die Aktivierung des Nucleus caudatus erklärbar, der vor allem für Routenfolgen berichtet wird (z.B. Hartley et al., 2003b). Eventuell automatisieren Männer den abzulaufenden Weg schneller als Frauen, weswegen episodische, das heißt sequentielle zeitlich-räumliche und Routeninformationen relevanter werden als räumliche Informationen wie sie in einer kognitiven Karte gespeichert wären. Die Distinktheit zwischen Wegefinden (allozentrisch) und Routenfolgen (egozentrisch) wie sie Hartley et al. (2003b) postulieren, kann so nicht gefunden werden, da die Männer sowohl den Hippocampus als auch den Nucleus caudatus während räumlicher Navigation aktiviert haben.

Zusätzlich dazu waren bei den Männern der Thalamus und der Gyrus postcentralis als somatosensorisches Areal aktiviert. Dies ist zunächst etwas erstaunlich, da beide Areale bisher wenig mit räumlicher Navigation in Zusammenhang gebracht wurden. Allerdings berichtet Karnath (2006) von einem so genannten Pusher-Syndrom, bei dem nach Thalamusläsion oder nach Läsionen in Insula und Gyrus postcentralis eine fehlerhafte Wahrnehmung der eigenen Körperorientierung im Raum auftritt. Karnath interpretiert dies dahingehend, dass es neben dem vestibulären System ein weiteres System zur Bestimmung und Kontrolle der eigenen Körperposition im Raum gibt, an dem die oben genannten Areale beteiligt sind. Somit ist es plausibel, dass diese Areale während räumlicher Navigation aktiviert sind. Wieso aber ist dies nur bei den Männern, nicht aber bei den Frauen der Fall? Es wird immer wieder argumentiert, dass Männer eher als Frauen euklidische Informationen zur Raumorientierung nutzen (z.B. Saucier et al., 2002). Dazu gehört vermutlich auch die Gewährleistung etwa des Heimkehrvektors. Es ist sehr plausibel, dass dafür eine Bestimmung der Position des eigenen Körpers im Raum notwendig ist. Interessanterweise ist auch bei der internalen Strategie, die vermutlich ebenfalls eine eher geometrische Informationsverarbeitung zur Grundlage (vgl. Abschnitt 2.4) hat, der somatosensorische Cortex, das heißt der Gyrus postcentralis aktiviert (s.u.), was mit dieser Interpretation konform geht.

Diese Interpretation folgt jedoch einer eher groben Bedeutungszuschreibung des somatosensorischen Cortex. Mittels eines von Schubert et al. (2008) spezifizierten Tools ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der ein aktiviertes Areal im Handareal liegt. Danach liegt das hier aktivierte Areal mit 10 bis 60 % Wahrscheinlichkeit im Handareal. Das bedeutet, dass die gefundene Aktivierung mit recht hoher Wahrscheinlichkeit vor allem auf das Spüren des in der Hand liegenden

Joysticks zurückzuführen ist. Es ist nicht klar, warum dies bei Pbn mit internaler Strategie stärker der Fall sein sollte als Pbn mit externaler.

Im direkten Vergleich mit Frauen in der Lutealphase zeigte sich bei den Männern nur im Präcuneus eine stärkere Aktivierung. Dies ist zwar nicht konsistent mit Grön et al. (2000), aber sehr wohl mit Schadow et al. (2004). Der Präcuneus wird allgemein mit verschiedenen Verhaltenskorrelaten in Verbindung gebracht. Die wichtigsten vier sind: visuell-räumliches Vorstellungsvermögen (*mental imagery*), Abruf episodischer Gedächtnisfunktionen, eine so genannte Selbstverarbeitung (s.u.) und Bewusstsein (vgl. Cavanna & Trimble, 2006).

Im Rahmen von Aufgaben zur visuell-räumlichen Vorstellung wird die Aktivierung des Präcuneus oft für die Bewegungsvorstellung (*motor imagery*) berichtet (z.B. Malouin et al., 2003; Hanakawa et al., 2003) und auch spezifischer für mentale Navigation (z.B. Ghaem et al., 1997). Cabeza und Kollegen (1997) vermuten allgemeiner, die Funktion des Präcuneus hinge mit dem Abruf zeitlicher Ordnungen zusammen.

Es zeigt sich, dass der Präcuneus bei vorgestellter Navigation aktiver ist als bei echter (virtueller) Navigation (z.B. Stephan et al., 1995). Malouin et al. (2003) fanden in ihrer PET-Studie für die Repräsentation von Hindernissen und ihrer Lokation relativ zur eigenen Person ein distinktes neuronales Netzwerk, das den Präcuneus in beiden Hemisphären, den rechten Parietalcortex und das linke SMA beinhaltet, wenn die Pbn sich das Durchlaufen einer virtuellen Umgebung vorstellen sollten.

Ghaem et al. (1997) ließen ihre Pbn ebenfalls eine virtuelle Umgebung lernen und diese anschließend gedanklich noch einmal durchlaufen. Diese Aufgabe wird offenbar von einem spezifischen mentalen Navigationsnetzwerk gefördert, das den linken posterioren Präcuneus, die Insula und den medialen Teil der Hippocampusformation beinhaltet. Ghaem et al. (1997) nehmen an, dass sowohl visuell-räumliche Vorstellung als auch Abrufprozesse mit Aktivierungen im posterioren Präcuneus zusammenhängen. Auch Ino et al. (2002) fanden zwar nicht explizit im Präcuneus, aber etwas allgemeiner im Bereich des parieto-occipitalen Sulcus Aktivierungen bei mentaler Navigation.

Insgesamt kann der Präcuneus also vor allem mit mentalem Vorstellen in Verbindung gebracht werden, vor allem mit der mentalen Vorstellung von Bewegung. Das bedeutet möglicherweise, dass Männer offenbar verstärkt den zu laufenden Weg bereits im Vorfeld mental repräsentieren, während Frauen dies eher weniger tun.

Ohnishi et al. (2006) zeigten zudem, dass der Präcuneus bei guten Navigierern stärker aktiviert ist als bei Personen mit einer schlechten Navigationsleistung. Es könnte

sich somit als eine günstige Strategie erweisen, den Weg bereits vor dem Loslaufen zu antizipieren und sich mental vorzustellen. Darum könnte genau dies den entscheidenden Unterschied zwischen guten und schlechten Navigierern ausmachen.

Neben der Rolle beim mentalen Vorstellen wird dem Präcuneus auch eine Rolle beim Abruf episodischer Gedächtnisinhalte nachgesagt (vgl. Cavanna & Trimble, 2006; Shallice et al., 1994). Dem Präcuneus wird eine Schlüsselrolle des neuronalen Substrats gedächtnisbezogener bildlicher Vorstellung zugeschrieben, was mit den oben beschriebenen Befunden zur bildlichen Vorstellung vereinbar ist. Besonders der posteriore Teil des Präcuneus zeigt in seiner Aktiviertheit starke Zusammenhänge mit dem erfolgreichen Abruf gelernter Episoden (vgl. z.B. Naghavi & Nyberg, 2005).

Zusätzlich dazu wird der Präcuneus mit Selbstverarbeitung in Zusammenhang gebracht, das heißt zum Beispiel mit Perspektivenübernahme, Sozialer Kognition und Selbstkonzept (vgl. Cavanna & Trimble, 2006). Dies könnte mit seiner Rolle im episodischen Gedächtnis ebenso zusammenhängen wie mit mentaler Vorstellung im Allgemeinen. Allerdings ist somit eher eine egozentrische Repräsentation durch den Präcuneus anzunehmen, was der Meinung entspräche, der parietale Cortex sei vor allem für eine egozentrische räumliche Verarbeitung relevant. Dass der Präcuneus eher für eine egozentrische Verarbeitung steht, ist auch konsistent mit den Ergebnissen der Studie von Zaehle et al. (2007), in der gezeigt wurde, dass als einzige Struktur der Präcuneus eine stärkere Aktivierung während einer egozentrischen Aufgabe aufwies und damit für die Verarbeitung egozentrischer räumlicher Informationen spezifisch ist.

Die Vorstellung, der Präcuneus sei an episodischen Gedächtnisprozessen beteiligt, ließe sich in Kongruenz zu der Interpretation von Grön et al. (2000) bringen, nach der Männer verstärkt episodische Informationen nutzen. Ich halte diese Interpretation allein aber für wenig plausibel. Ein Zusammenspiel episodischer und mental-imaginativer Prozesse erscheint wahrscheinlicher.

Männer weisen eine größere räumliche Selbstsicherheit auf (vgl. z.B. Lawton, 1994), was sich zum Beispiel auch in ihrer höheren Einschätzung ihrer eigenen Orientierungsfähigkeit (*sense of direction*) in dieser Studie zeigte. Eine andere plausible Erklärung für die stärkere Aktivierung des Präcuneus bei Männern ist darum, dass sie die Aufgabe im virtuellen Labyrinth schlicht als leichter empfunden haben als die Frauen. Der Präcuneus könnte nämlich auch mit der Aufgabenschwierigkeit zusammenhängen: Umso leichter die Aufgabe empfunden wird, umso stärker ist die Aktivierung im Präcuneus: Binder und Kollegen diskutieren den Präcuneus als Teil eines Ruhezustands-

Netzwerks: Teile dieses Netzwerks sind umso aktiver, desto inaktiver das Gehirn insgesamt gerade ist (Binder et al., 1999).

Die Frauen zeigten im Gegensatz zu Männern neuronale Aktivierungen im linken Cerebellum und im rechten Gyrus fusiformis. Die stärkere Aktivierung des linken Cerebellums bei Frauen im Vergleich zu den Männern ist konsistent mit den Ergebnissen der Studie von Schadow et al. (2004). Allerdings ist dessen Aktivierung insgesamt ein interpretatorisch schwieriger Punkt, da lange Jahre davon ausgegangen wurde, dass das Kleinhirn vor allem für eine Art Feinjustierung motorischer Handlungen zuständig sei. Inzwischen mehren sich die Hinweise, dass dies die Funktionen des Cerebellums maßlos unterschätzt und dieses sehr wohl auch an höheren kognitiven Funktionen beteiligt ist (z.B. Katz & Steinmetz, 2002). Dass es sogar ganz speziell an räumlicher Navigation beteiligt ist, zeigt sich an tierexperimentellen Läsionsstudien: Nager mit künstlicher Läsion oder Mutation im Cerebellum weisen signifikante Leistungseinbußen im Morris-Wasserlabyrinth auf (vgl. z.B. Lalonde & Strazielle, 2003; Molinari & Leggio, 2007). Es kann aber auch in neuropsychologischen Untersuchungen beim Menschen gezeigt werden, dass das Cerebellum in räumliche Orientierung im weitesten Sinne involviert ist (z.B. Lee et al., 2005). Es wird vermutet, dass eine cerebellare Schädigung nur dann die visuell-räumlichen Fähigkeiten einschränkt, wenn aktiv mental operiert werden muss (vgl. z.B. Molinari & Leggio, 2007). Interessanterweise zeigte sich, dass nicht nur Frauen eher cerebellare Aktivierungen zeigten, sondern auch Pbn mit externaler Navigationsstrategie, diese sogar noch deutlicher als die Frauen. Die Aktivierung des Cerebellums ist somit tendenziell „weiblich“ und mit einer externalen Strategie verknüpft (s.u.).

Im direkten Vergleich mit Männern zeigten sich bei Frauen vor allem neuronale Aktivierungen im rechten superioren, tendenziell posterioren Parietallappen, rechts in visuellen Arealen und im rechten Gyrus temporalis medius (vermutlich hOC5, welches ein sekundäres visuelles Areal ist).

Es lässt sich zunächst einmal feststellen, dass Frauen während (virtueller) räumlicher Navigation stärker als Männer visuelle Areale aktivieren. Dies ließe sich damit erklären, dass sie vermehrt visuelle Aufmerksamkeit auf ihre Umgebung richten, beziehungsweise richten müssen. Es zeigt sich aber, dass Frauen auch generell stärkere Aktivierungen auf bewegte visuelle Reize wie etwa ein virtuelles Labyrinth aufweisen wie weiter unten noch diskutiert wird.

Dass verstärkt parietale Areale aktiviert werden, ist konsistent mit den Ergebnissen von Grön et al. (2000), die bei Frauen im Vergleich mit Männern ebenfalls

rechts parietale Aktivierungen fanden und dies dahingehend interpretieren, dass Frauen mehr egozentrische Strategien verwenden und die Umgebungsinformationen eher in Bezug auf sich selbst verarbeiten. Aktivierungen speziell in superior-posterioren Arealen des Parietalcortex entstehen nach Ansicht von Halsband und Lange (2006) vermutlich durch visuell-räumliche Prozesse. Vor allem die räumliche Verknüpfung von Augen- und Handbewegungen, sowie deren Planung und Ausführung findet sowohl im superioren wie auch im inferioren Parietallappen statt, das heißt diese Areale sind relevant für die Hand-Augen-Koordination (Battaglia-Mayer, Archambault, & Caminiti, 2006). Es wäre denkbar, dass Frauen nicht nur stärker egozentrisch enkodieren, sondern zusätzlich dazu auch mehr Schwierigkeiten mit der Koordination des visuellen Inputs und der Bewegungsausführung mittels Joystick hatten.

Besonders interessant im Geschlechtervergleich ist die verstärkte Aktivierung des hOC5 (*human occipital cortex 5*) bei den Frauen im Vergleich zu den Männern. Es kann angenommen werden, dass das hOC5 dem funktionell definierten V5 im visuellen Cortex entspricht (vgl. z.B. Amunts et al., 2007). Das hOC5 ist Teil des dorsalen Pfades („Wo“-Bahn) (Mishkin et al., 1983), und es ist weitestgehend akzeptiert, dass es einen signifikanten Beitrag zur Bewegungswahrnehmung hat (z.B. Schenk, Ellison, Rice, & Milner, 2005). Es kann als das bewegungssensitive Areal angesehen werden. Warum aber haben Frauen dort nun eine stärkere Aktivierung?

Schon an anderer Stelle wurden Geschlechtsunterschiede bezüglich des V5 oder des hOC5 berichtet (vgl. Amunts et al., 2007). So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass eine starke bewegte visuelle, binokulare Reizung zu höheren EEG-Amplituden im rechten V5 als im linken bei Mädchen, nicht aber bei Jungen führt (Cohn, Kircher, Emmerson, & Dustman, 1985). In einer fMRI-Studie mit einem Flickerreiz zeigten Frauen mehr neuronale Aktivität als Männer im Bereich des hOC5 (Kaufmann, Elbel, Gössl, Pütz, & Auer, 2001). Das bedeutet, es gibt generelle Geschlechtsunterschiede bei der Reaktion auf bewegte visuelle Reize innerhalb des hOC5.

Amunts et al. (2007) berichten, dass das hOC5 auch zytoarchitektonische und morphometrische Unterschiede zwischen den Geschlechtern aufweist, ebenso wie übrigens auch der primäre visuelle Cortex. Es existieren Unterschiede in der interhemisphärischen Symmetrie der Größe des hOC5, insofern als dass diese bei Frauen stärker ist. Auch in dem Verhältnis zwischen primärem visuellen Areal (Area 18) und dem hOC5 unterscheiden sich Männer und Frauen dahingehend, dass dieses bei Frauen kleiner ist (Amunts et al., 2007). Diese Unterschiede könnten nach Amunts et al. (2007) allgemein die Ursache dafür sein, dass Männer in der Regel besser in visuell-räumlichen

Aufgaben abschneiden, da diese Unterschiede in der Morphometrie dazu führen könnten, dass Männer mehr Verarbeitungsraum zur Verfügung haben als Frauen.

Neben der Untersuchung von Geschlechtsunterschieden neuronaler Aktivierungen während räumlicher Navigation war es ein wichtiges Ziel dieser Studie, neuronale Aktivierungsunterschiede in Abhängigkeit von der verwendeten Navigationsstrategie zu untersuchen. Auch hier zeigten sich deutliche Unterschiede. Pbn mit einer externalen Navigationsstrategie wiesen im Gegensatz zu Pbn mit internaler Strategie neuronale Aktivierungen im Präcuneus, im posterioren Cingulum, im linken Cerebellum und im Hippocampus auf.

Die Rolle des Präcuneus in räumlicher Navigation wurde bereits oben diskutiert. Es ist durchaus plausibel, dass sich Pbn mit externaler Strategie, das heißt mit einer Strategie, die sich an visuellen Objekten orientiert, sich diese gleichsam noch einmal „vor Augen“ führen, während sie den Weg zu ihnen einschlagen, das heißt sie stellen sich diese mental vor. Ebenso wäre es plausibel anzunehmen, dass sie weniger kognitiven Aufwand betreiben müssen, da sie sich lediglich ein Objekt merken müssen und dass zum Beispiel links daneben das Ziel ist. Im Sinne des Ruhezustands-Netzwerk (siehe oben) befänden sich diese Pbn weniger in einem Arbeitsmodus. Dies gälte aber nur dann, wenn die externe Strategie tatsächlich keine räumliche, allozentrische Strategie darstellt wie in dieser Studie angenommen wird. In anderen Arbeiten wird die externe Strategie aber als die allozentrische Strategie angesehen, der Präcuneus scheint aber vielmehr für egozentrische Referenzsysteme spezifisch zu sein (vgl. z.B. Zaehle et al., 2007). Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Gleichsetzung von externaler und allozentrischer Strategie so nicht richtig ist.

Generell sagt man, das Cingulum sei an verschiedensten Aufmerksamkeitsprozessen beteiligt. Es ist aber vor allem der anteriore Bereich des Cingulums, der etwa an der räumlichen Ausrichtung der Aufmerksamkeit beteiligt ist (z.B. Thiel, Zilles, & Fink, 2004). Allerdings gibt es neuropsychologische Hinweise, dass auch der posteriore Teil des Cingulums an räumlichen Orientierungsprozessen beteiligt ist. Bei Läsionen des posterioren Teils des Cingulums kommt es zu *heading disorientations*, das heißt die Patienten sind unfähig einen Kurs, das heißt eine Bewegungsrichtung festzulegen, obwohl sie sehr wohl in der Lage sind, zum Beispiel Landmarken wiederzuerkennen oder ihr Ziel zu nennen, sowie ihren Standort zu bestimmen (vgl. Kolb & Wishaw, 2003). Das heißt konkret, dass nicht die räumliche Orientierung als solche gestört ist, sondern die Handlungsplanung als Subprozess der Navigation (vgl. Abb. 1 in Abschnitt 1.2). Dass bei einer externalen Strategie diese Fähigkeit besonders notwendig ist, leuchtet

ein: Wer eine solche Strategie wählt, überlegt sich möglicherweise zunächst, dass sich das Ziel links vom Berg befindet. Dann blickt sich der externe Strategie um, sucht den Berg und schlägt dann die entsprechende Richtung ein. Das bedeutet, er legt vorher sein Ziel fest und schlägt dann die entsprechende Richtung ein. Genau dieses Richtungeinschlagen ist aber bei Schädigung des posterioren Cingulums nicht mehr möglich.

Es ist hypothesenkonform, dass gerade in der Gruppe der Pbn mit externaler Strategie der Hippocampus aktiv ist, in der anderen Gruppe jedoch nicht, auch wenn im direkten Vergleich kein signifikanter Unterschied zu finden ist. Da der Hippocampus für ein Ortsgedächtnis angenommen wird, ist dies nicht überraschend und bestätigt, dass der Hippocampus für eine Strategie an externen Hinweisreizen spezifisch ist (vgl. Hartley et al., 2003b; Iaria et al., 2003). Allerdings wird vor allem der rechte Hippocampus dafür angenommen, der linke sei eher an episodischen Gedächtnisabrufen beteiligt (z.B. Burgess et al., 2002). Eventuell merken sich Pbn mit externaler Strategie gar keine Ortslokationen und deren Beziehung zueinander, so wie es eine kognitive Karte oder eine allozentrische Repräsentation nahe legen würde, sondern eher wie sie zum Beispiel beim Berg durch die Tür gegangen sind, was eher einer episodischen Repräsentation entspräche. Damit ließe sich auch erklären, warum diese Pbn kaum Überblickswissen inklusive des Verhältnisses der externen Landmarken generiert haben, obwohl die externe Strategie als die „räumliche“, allozentrische Strategie angesehen wird.

Im direkten Vergleich mit der internalen Strategie wiesen Pbn mit externaler Strategie signifikant stärkere Aktivierungen in primären visuellen Arealen auf, sowie im linken Cerebellum.

Die Rolle des Cerebellums für räumliche Navigation wurde ebenfalls bereits oben diskutiert. Im Zusammenhang mit den Strategien räumlicher Navigation bleibt aber noch ein interessanter Aspekt zu berichten: In tierexperimentellen Studien zeigte sich, dass gesunde Ratten im Morris-Wasserlabyrinth (MWM) drei verschiedene Strategien nutzen können, die Molinari und Leggio (2007) *taxic*, *place* und *praxic strategy* nennen. Eine *taxic strategy* ist dabei eine, die man tendenziell auch als Wegleitestrategie (vgl. auch Abschnitt 1.3.1) bezeichnen könnte, das heißt eine Strategie, nach der man sich an einem Hinweisreiz orientiert, der das Ziel direkt markiert. Eine *place strategy* entspricht am ehesten der externalen Strategie und eine *praxic strategy* einer internalen. Tiere, meist Ratten, mit einer cerebellaren Läsion oder Mutation können dagegen nicht alle Strategien gleichermaßen umsetzen: Sie sind unfähig eine *place strategy*, also eine externe Navigationsstrategie anzuwenden (Molinari & Leggio, 2007). Obwohl vergleichbare

Untersuchungen noch nicht am Menschen, das heißt Patienten mit cerebellarer Schädigung durchgeführt wurden, deuten die Unfähigkeit zur Verwendung einer externalen Strategie nach Kleinhirnschädigung und die Aktivierung des Cerebellums vor allem bei Pbn, die eine externalen Strategie verwenden darauf hin, dass das Cerebellum für diese Strategie spezifisch ist. Dass Pbn mit externaler Strategie auch stärkere visuelle Aktivierungen aufweisen, ist einleuchtend, da sie viel mehr ihre visuelle Aufmerksamkeit auf die externen Landmarken richten müssen.

Pbn mit einer internalen Navigationsstrategie wiesen im Gegensatz zu Pbn mit externaler Strategie neuronale Aktivierungen im linken Gyrus fusiformis, im linken Gyrus angularis, im linken anterioren Cingulum und in superioren Bereichen des Parietallappens auf.

Der Gyrus angularis im inferioren Parietallappen wird mit einer Vielzahl visuell-räumlicher Aufgaben in Zusammenhang gebracht. Interessant sind in diesem Zusammenhang besonders neuropsychologische Befunde zum Gerstmann-Syndrom, das unter anderem nach Schädigung des Gyrus angularis auftritt. Bei diesem Syndrom kommt es neben anderen Ausfällen zu einer Rechts-Links-Schwäche, das heißt die Patienten sind unfähig Links und Rechts auseinander zu halten (vgl. z.B. Gold, Adair, Jacobs, & Heilman, 1995). Es ist zu vermuten, dass dies für eine internalen Strategie besonders relevant ist, bei der es mehr auf die Abbiegungen ankommt als bei einer externalen Strategie.

Wie oben bereits erwähnt, gehen Battaglia-Mayer et al. (2006) davon aus, dass im superioren wie auch im inferioren Parietallappen die räumliche Verknüpfung von Augen- und Handbewegungen, sowie deren Planung und Ausführung stattfindet. Da diese Planung bei der internalen Strategie, bei der man sich eine feste Route und die dafür nötigen Bewegungen in Abhängigkeit vom visuellen Geschehen merken muss, vordergründiger ist als bei einer externalen Strategie, ist die stärkere Aktivität im superioren Parietallappen verständlich.

Im direkten Vergleich mit der externalen Navigationsstrategie bleiben für die internalen Strategie Aktivierungen im rechten mittleren Cingulum, beziehungsweise im prämotorischen Areal und im Gyrus postcentralis.

Vermutlich und laut cytoarchitektonischem Atlas handelt es sich gar nicht um Aktivierungen im Cingulum, sondern um welche in der nahe gelegenen Area 6, dem prämotorischen Areal. Dieses ist an der Erstellung von Bewegungsentwürfen und deren Abstimmung mit Kleinhirn und Basalganglien beteiligt (z.B. Halsband & Lange, 2006). Gerade für die internalen Strategie wäre dies sehr plausibel. Die Hypothese erwartete zwar

entsprechend den Ergebnissen von Iaria et al. (2003) und Hartley et al. (2003b) Aktivierungen im Nucleus caudatus, was hier so nicht gefunden wurde. Allerdings ist auch die Aktivierung prämotorischer Areale auf gleicher interpretatorischer Ebene anzuordnen: Dadurch dass vor allem bei der internalen Strategie eine zum Teil recht automatisierte Route und die zum Ablufen dieser nötigen Bewegungsabläufe repräsentiert werden müssen, während bei der externalen vermutlich lediglich eine Lokation gemerkt werden musste, ist es plausibel, dass gerade bei dieser Strategie prämotorische Areale vermehrt beteiligt sind.

Welche Rolle der somatosensorische Cortex, das heißt der Gyrus postcentralis bei räumlicher Navigation spielt wurde oben bereits dargestellt. Vermutlich spielt er eine Rolle bei der Bestimmung und Kontrolle der eigenen Körperposition (vgl. Karnath, 2006). Es erscheint vor allem unter der Perspektive, dass vermutlich gerade die internele Strategie verstärkt geometrisch-vektorielle Informationen wie den Heimkehrvektor benötigen dürfte, sehr nachvollziehbar, dass gerade bei Anwendung dieser Strategie der somatosensorische Cortex aktiv ist.

Shelton und Gabrieli (2002) zeigten, dass neben medialen temporalen Strukturen und dem anterior-superioren Parietallappen eben auch der Gyrus postcentralis stärker aktiviert war, wenn Pbn eine Umgebung aus der Erste-Person-Perspektive lernten als wenn sie dies aus einer Vogelperspektive heraus taten. Die Autoren interpretieren dies dahingehend, dass diese Areale, das heißt auch der Gyrus postcentralis, für eine Routenrepräsentation „zuständig“ sind, während für Überblickswissen andere Areale beteiligt sind. Diese Interpretation sowie die Aktivierungen im Gyrus angularis legen nahe, dass die internele Strategie eine egozentrische Routenstrategie, die externaler eine allozentrische Überblicksstrategie sei, obwohl bereits in Abschnitt 2.4 diskutiert wurde, dass dem möglicherweise nicht so ist. Es ist natürlich schon so, dass Pbn mit internaler Strategie die eigene Bewegung durch das Labyrinth repräsentieren und damit sehr wohl auch eine egozentrische Erste-Person-Perspektive einnehmen dürften. Newcombe (2002) subsumiert zu einem egozentrischen Referenzsystem und somit zu einer Erste-Person-Perspektive auch Informationen zum Beispiel über den Heimkehrvektor oder die Koppelnavigation (vgl. Abschnitt 1.3.1), beides Informationen, die auf räumlichen, das heißt geometrischen Aspekten beruhen. Darum können Pbn mit internaler Strategie dennoch besonders während der Exploration ein tiefgreifendes räumliches Wissen gespeichert haben, das sie befähigen würde, zum Beispiel beim Auftreten eines Hindernisses von der egozentrischen Perspektive zu abstrahieren. Dass sie dies besser können als Pbn mit externaler Strategie zeigen vor allem die Verhaltensdaten der ersten

Studie, nach der Pbn mit internaler Strategie viel häufiger Überblickswissen generiert haben. Es ist meines Erachtens vor allem ressourcenschonender nur die Route aktiv und aktuell zu repräsentieren, was nicht gleichbedeutend damit ist, dass kein Überblickswissen vorhanden ist. Offensichtlich wird, dies legen die Ergebnisse der Aktivierungsanalyse nahe, bei einer internalen Strategie eine Route aus egozentrischer Sicht gemerkt, wofür in Anlehnung an die Studie von Shelton und Gabrieli (2002) und die Erkenntnisse zur Pusher-Symptomatik (Karnath, 2006) auch die Aktivierung des Gyrus postcentralis spricht. Diese egozentrische Perspektive scheint aber nicht auszuschließen, dass allozentrisches, also Überblickswissen generiert wird (siehe dazu auch Abschnitt 5.1).

Obwohl die Verhaltensdaten der ersten Studie wie der zweiten Studie nahe legen, dass die interne Strategie gar keine egozentrische Routenstrategie ist, deuten die neuronalen Aktivierungen doch darauf hin: Während Pbn mit externaler Strategie keine oder kaum Aktivierungen in parietalen Bereichen (außer dem Präcuneus) aufweisen, die für ein egozentrisches Referenzsystem als spezifisch gelten, tun dies die Pbn mit internaler eben doch. Allerdings weisen die Externalen demgegenüber eben Aktivierungen im Präcuneus auf, der ebenfalls für ein egozentrisches Bezugssystem spezifisch ist (Zachle et al., 2007). Ferner scheint gerade die Aktivierung im somatosensorischen Cortex bei der internalen Strategie für eine egozentrische Perspektive zu sprechen. Es ist insgesamt also unklar, welche Prozesse und Referenzsysteme den beiden Strategien nun wirklich zugrunde liegen.

Es wäre notwendig ein Modell zu formulieren, das diese scheinbaren Widersprüchlichkeiten deutlicher macht. Um den Subprozessen etwas näher zu kommen, wurde in der folgenden Untersuchung der Frage nachgegangen, welches Referenzsystem den Strategien nun wirklich zugrunde liegt.

Zusätzlich zu Verhaltensdaten und neuronalen Aktivierungsdaten in Abhängigkeit von Geschlecht und Navigationsstrategie wurde auch der Einfluss der Sexualhormone auf diese untersucht. In der ersten Studie zeigte sich, dass Progesteron und vermutlich auch Östrogen die Strategiewahl modulieren. Da gezeigt werden kann, dass Sexualhormone nicht nur Einfluss auf die Reproduktion, das heißt auf periphere Organe haben, sondern auch im ZNS wirken und zudem einen Einfluss auf Leistungen und Strategiewahl in räumlichen Aufgaben haben können, ist es plausibel, dass sie ebenso auf die neuronale Aktivierung wirken. In der vorliegenden Studie konnte dies aufgezeigt werden. Allerdings wurden aufgrund der zu erwartenden größeren Varianz

nur bei den Männern der Einfluss des Testosterons und bei den Frauen der von Progesteron und Östrogen analysiert.

Bei den Männern zeigte sich, dass Männer umso weniger neuronale Aktivierung im Hippocampus aufweisen, desto niedriger ihr Testosteronspiegel ist. Das ist deswegen interessant, weil der Hippocampus als der Sitz der kognitiven Landkarte angesehen wird, das heißt für eine allozentrische Repräsentation räumlicher Strukturen verantwortlich zeichnet. Eine allozentrische Repräsentation wird aber gleichzeitig mit einer männlichen Navigationsstrategie in Zusammenhang gebracht. Nun zeigt sich aber, dass der Hippocampus umso weniger beansprucht wird, desto mehr Testosteron, das heißt gewissermaßen desto „männlicher“ die Pbn sind. Korol (2004) argumentiert, dass Östrogen als das „Gegenstück“ zum Testosteron positiv auf den Hippocampus wirkt und zwar konkret die Menge dendritischer Spines erhöht und damit auf die Erregbarkeit und synaptische Plastizität im Hippocampus wirkt. Ebenso berichtet Korol (2004), dass Östrogen die Wahl einer externalen Strategie im Labyrinth wahrscheinlicher macht. Wie wir gesehen haben, ist vor allem bei der externalen Strategie der Hippocampus beteiligt, nicht aber bei der internalen. Es zeigte sich in der ersten Studie ebenfalls, dass zumindest tendenziell Frauen eher eine externe Navigationsstrategie präferierten und dass zumindest Progesteron diese ebenfalls begünstigte. Damit könnte man annehmen, dass die externe Strategie am ehesten einer „weiblichen“ Strategie entspricht, womit dann verständlich würde, warum Männer, wenn sie besonders „männlich“ sind aufgrund ihres hohen Testosteronlevels auch weniger die „weibliche“ externe Strategie mit Hippocampusbeteiligung wählen. Es muss deshalb auch gefragt werden, ob die Interpretation im Hippocampus säße die kognitive Landkarte unbedingt so haltbar ist. Eventuell spielt der Hippocampus eher eine Rolle beim Objektlokationsgedächtnis, das heißt beim räumlichen Gedächtnis als bei der Erstellung und Nutzung einer räumlichen kognitiven Landkarte. Es zeigt sich schließlich, dass räumliches Gedächtnis und räumliche Orientierung nicht das gleiche sind (vgl. Abschnitt 1.2). Dies würde auch mit der allgemeinen Vorstellung zusammen passen, Frauen nutzten eher Landmarken, das heißt Objektlokationen zur Orientierung und Männer nicht. Dies noch genauer zu untersuchen könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Bei Frauen wiederum zeigte sich eine Modulation der neuronalen Aktivierungen durch Östrogen und Progesteron vor allem in visuellen Arealen. Wie bereits ausgeführt unterscheiden sich Männer und Frauen in Cytoarchitektur und Morphometrie in ihren visuellen Arealen. Dass dies unter anderem durch Sexualhormone moduliert sein könnte, ist denkbar. Progesteron scheint dabei einen positiven, Östrogen dagegen eher einen

negativen Einfluss auf das Ausmaß der neuronalen Aktivierung im visuellen Cortex zu haben. Da auch für die externe Strategie verstärkte Aktivierung in visuellen Bereichen gefunden wurde und Progesteron die Wahl einer solchen Strategie befördert, könnte dies in direktem Zusammenhang zueinander stehen.

Die Erhebung der Sexualhormone Östrogen, Progesteron und Testosteron war in dieser Studie erfolgreicher als in der vorhergehenden. Die Analyse der Speichelproben ergab für alle drei Hormone plausible Werte. Ferner wurden diese nun nicht mehr nur über die Analyse des Speichels, sondern zusätzlich dazu über eine Analyse des Hormonstatus‘ im Blutserum bestimmt. Die Ergebnisse dieser Doppelbestimmung zeigen, dass die Korrelationen zwischen beiden Bestimmungen hoch sind, so dass man sagen kann, dass die Bestimmung über den Speichel als reliabel einzuschätzen ist. Dies ist ein erfreuliches Ergebnis, da eine Bestimmung der Hormone über den Speichel ökonomischer und bei den meisten Pbn weniger angstbesetzt ist. Allerdings muss dennoch einschränkend gesagt werden, dass nur über die Bestimmung der Serumwerte eine klare Zuordnung zu einer bestimmten Phase des Menstruationszyklus der Frau möglich war. In der vorliegenden Studie zeigte sich etwa, dass sich von den elf getesteten Frauen nur sieben tatsächlich wie gewünscht in der Lutealphase befanden (Brandhorst et al., 2008). Sollte es in zukünftigen Studien gewünscht sein, alle Frauen zu einem vergleichbaren Zeitpunkt zu messen, so ist die Speichelprobenmethode in ihrer bisherigen Qualität als unzureichend einzuschätzen. In der Regel will man die Frauen aber nur deswegen in einer bestimmten Phase testen, um zum Beispiel wie in der vorliegenden Studie, die Unterschiede in den Hormonleveln zwischen den Geschlechtern maximal zu halten, da während der Lutealphase des Menstruationszyklus (vgl. Abschnitt 1.5.1.2) die Hormone Progesteron und Östrogen relativ hochkonzentriert sind. Für Korrelationsstudien zum Beispiel bezüglich der Performanz in bestimmten Aufgaben dürfte es daher nebensächlich sein, in welcher Phase genau sich die Frau zum Zeitpunkt der Messung tatsächlich befand. Interessanter ist dann der Zusammenhang der Hormonkonzentration zu den Leistungen. Dafür eignet sich die Erfassung über eine Analyse des Speichels durchaus. In der vorliegenden Studie kam es nicht ausschließlich auf Korrelationen an, sondern auch auf Gruppenunterschiede. Darum wurden die vier Probandinnen, die sich offensichtlich nicht in der Lutealphase befanden, aus den Gruppenanalysen ausgeschlossen, was für die statistische Analyse der Gruppenvergleiche (11 versus 7) auf Verhaltensebene eher ungünstig war.

Abschließend soll noch auf einen methodischen Aspekt dieser Studie eingegangen werden. Neben der Frage, ob in Zukunft Speichelproben zur Bestimmung

der Hormonkonzentrationen genutzt werden sollen, ist noch folgende Frage zu bedenken: Wie sieht eine geeignete Kontrollbedingung im virtuellen Labyrinth aus? In dieser Studie wurde als Kontrollbedingung ein normaler Labyrinthdurchgang gewählt, in dem nicht orientiert werden musste, sondern einer weißen Linie auf dem Boden gefolgt werden musste. Visueller Input, sowie motorische Anstrengung dürften dabei gleich geblieben sein, so dass durch Abzug der neuronalen Aktivierungen während Navigation tatsächlich nur noch diejenigen Areale „übrig“ bleiben dürften, die tatsächlich an der Navigation und nicht zum Beispiel am Sehen des optischen Flusses beteiligt sind. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Kontrollbedingung wohl etwas zu stark war, in dem Sinne, dass auch die Bewältigung dieser einige kognitive Anstrengungen voraussetzte, so dass auch hier die neuronalen Aktivierungen recht stark waren. Darum konnten die Kontraste zwischen Experimental- und Kontrollbedingung nur auf einem unkorrigierten Signifikanzniveau analysiert werden. Das erschwert die Interpretation der Ergebnisse etwas, da zufällige Aktivierungsunterschiede nicht ausgeschlossen werden können. Wie aber eine weniger starke Kontrollbedingung aussehen könnte ohne eine ganz andere Aufgabe darzustellen bleibt unklar.

Ein weiterer Aspekt ist ein genereller im Rahmen funktioneller Bildgebung: Aufgrund bestimmter neuronaler Aktivierungen während hochkomplexer kognitiver Aufgaben werden in den meisten bildgebenden Studien Schlussfolgerungen auf das „Denken“ gezogen. Dies scheint dadurch gerechtfertigt, dass zum Beispiel Studien, die rein perzeptuelle Aspekte der menschlichen kognitiven Wahrnehmung untersuchen, immer wiederkehrende Aktivierungen zum Beispiel im primären visuellen Cortex bei visueller Reizung aufzeigen. Es lassen sich recht genaue Karten des visuellen Cortex auf diese Art aufstellen. Doch sobald man sich in Gefilde begibt, die über die reine Wahrnehmung hinausgehen, bleibt alles, was man in die funktionellen Bilder hineininterpretiert letztendlich Spekulation, zumal sich dabei dann eben nicht immer wieder die gleichen Areale als aktiviert erweisen. In der einen Studie ist der Hippocampus aktiviert, in der anderen nicht, in dieser dafür dann aber der präfrontale Cortex und so weiter. Räumliche Navigation ist sehr wahrscheinlich ein hochkomplexer kognitiver Prozess. Man kann davon ausgehen, dass sich bei aller Generalisierbarkeit bestimmter Prozesse, hier hochindividuell unterschiedliche Subprozesse zu einem Gesamtprozess namens räumlicher Navigation konvergieren, zumal in verschiedenen Studien unterschiedliche Operationalisierungen gewählt werden. Was das einzelne Individuum nun wirklich während des Durchlaufens des Labyrinth „gedacht“ hat, das wird man vermutlich nicht herausfinden können.

4. Studie 3: Räumliche Referenzsysteme und Navigationsstrategien

4.1 Einführung

Es hat sich in den ersten beiden Studien gezeigt, dass die Gleichsetzung einer *Place Strategy*, beziehungsweise einer externalen Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth mit einer allozentrischen oder Überblicksstrategie, wie sie von einigen Autoren (z.B. Korol et al., 2004; Schmitzer-Torbert, 2007) vorgenommen wird, nicht haltbar ist. Das gleiche gilt für die Gleichsetzung von *Response* oder internaler Strategie mit einer egozentrischen Routenstrategie. Hauptziel dieser dritten Studie war es daher zu überprüfen, inwieweit die im Labyrinth gewählten Navigationsstrategien mit so genannten räumlichen Referenzsystemen zusammenhängen.

Korol (2004; Korol et al., 2004) und zum Beispiel auch Schmitzer-Torbert (2007) argumentieren, dass die Orientierung an externen Objekten, welche vom Betrachter unabhängig sind, bedeutet, dass ein allozentrisches räumliches Referenzsystem genutzt wird, während das Merken einer Route, beziehungsweise eines Antwortmusters, das in direktem Zusammenhang mit der eigenen Person und seiner Startposition steht, mit dem Nutzen eines egozentrischen Referenzsystems zusammenhängt.

Es zeigte sich aber vor allem in der ersten Studie, dass Pbn mit einer internalen, vermeintlich egozentrischen Strategie im Labyrinth hinterher den Grundriss des Labyrinths signifikant häufiger richtig wiedergeben konnten als Pbn mit der vermeintlich allozentrischen Strategie (siehe Abschnitt 2.3.4.3). Dies steht im Widerspruch zu der Vorstellung, dass ein allozentrisches Referenzsystem zur Ausbildung einer kognitiven Karte führt, ein egozentrisches dagegen nicht.

Ferner zeigte sich in Studie 1, dass die Wahl einer internalen, *Response Strategy* signifikant mit hohen Werten auf der Skala Orientierungsstrategie der Alltags-Strategie-Skala (ASS) zusammenhing. In Studie 2 zeigte sich zudem, dass Pbn mit einer externalen, *Place Strategy* höhere Werte auf der Routenstrategieskala der ASS und niedrigere Werte auf der Skala „Überblick“ des Fragebogens zu räumlichen Repräsentationen (dQSR) angaben und zumindest tendenziell auch niedrigere Werte auf der Skala *Sense of Direction* (allgemeiner Orientierungssinn) hatten. Dies ist nicht konsistent mit der Annahme, dass die externe Strategie die allozentrische und darum objektivere und flexiblere Strategie ist, die zu Überblickswissen führt. Auch spricht dies nicht unbedingt für die Annahme, dass die Orientierung an externen Landmarken (externale Strategie) eine „räumliche“ Strategie darstellt, die an Abzweigungen (internale Strategie) dagegen eine „nicht-räumliche“, wie zum Beispiel von Iaria et al. (2003) und Etchamendy und Bohbot (2007) argumentiert wird.

Insgesamt sprechen die Daten der eigenen Studien eher dafür, dass die internale Strategie einer allozentrischen oder Orientierungsstrategie entspricht. Das ist theoretisch auch nicht unplausibel: Da in der internalen Strategie ohne Landmarken orientiert wird, könnten hier eher geometrische, euklidische, daher objektive Informationen verwendet werden (allozentrisches Bezugssystem). Umgekehrt könnte sich jemand, der sich an den externen Landmarken orientiert, viel mehr mit seiner eigenen Position und deren Bezug zu den Landmarken auseinander setzen und deswegen womöglich eher ein egozentrisches Bezugssystem nutzen. Eine räumliche Repräsentation der Umgebung wäre hierfür unnötig: Der Pb müsste nur schauen, wo er sich zu Beginn des Durchlaufs in Relation zu der entsprechenden Landmarke befindet und diese dann ansteuern (Wegleitung, vgl. Abschnitt 1.3.1).

Andererseits könnte jemand, der eine internale Strategie nutzt, natürlich genau wie von anderen Autoren berichtet sich allein die motorische Abfolge des Weges merken oder verbal kodieren (zum Beispiel „Erst muss ich nach links, dann zweimal nach rechts“), was tatsächlich einer nicht-räumlichen oder egozentrischen Strategie entspräche. Welches Referenzsystem liegt nun also den beiden verhaltensexperimentell differenzierbaren Navigationsstrategien zugrunde? Gibt es überhaupt einen Zusammenhang?

Um diese kritische Frage schlussendlich beantworten zu können, wurde in diesem Experiment der Zusammenhang zwischen räumlichen Referenzsystemen und Navigationsstrategien untersucht. Zur Untersuchung der räumlichen Referenzsysteme wurde eine Aufgabe verwendet, die erstmals von Schönebeck, Thanhäuser und Debus (2001) beschrieben wurde (vgl. Abschnitt 4.2.3.2).

Zusätzlich dazu hatte die dritte Studie noch ein weiteres, eher exploratives Ziel. In den bisherigen Studien hatte sich gezeigt, dass Geschlecht oder Sexualhormone die individuellen Navigationsstrategiepräferenzen nur unzureichend erklären können. Geht man davon aus, dass solche Strategiepräferenzen relativ überdauernd sind wie eine überdauernde Eigenschaft, so ist es nicht unplausibel, dass diese durch bestimmte Persönlichkeitseigenschaften moduliert werden oder mit diesen zusammenhängen. Blickle (1996) konnte zeigen, dass verschiedene Lernstrategien von Studenten mit den Persönlichkeitsfaktoren Offenheit für Erfahrung und Gewissenhaftigkeit der so genannten Big Five zusammenhängen und darüber die Leistung modulieren. Bereits 1972 fand Ferstl ebenfalls Zusammenhänge zwischen Lernstrategien und Persönlichkeitseigenschaften, vor allem Extraversion (Ferstl, 1972). Einen Zusammenhang von Leistungen in räumlichen Aufgaben und Persönlichkeit fand Ozer

(1987): Räumliche Visualisierung hängt bei Mädchen mit deren Persönlichkeit zusammen, nicht aber bei Jungen. Lawton (1994) konnte zeigen, dass Ängstlichkeit im Sinne einer Eigenschaft mit räumlichen Leistungen zusammenhängt: Die Anzahl der Fehler in räumlicher Wahrnehmung und mentaler Rotation korrelierten in dessen Studie signifikant negativ mit dem Ausmaß der räumlichen Ängstlichkeit und die Werte auf der Skala Orientierungsstrategie ebenfalls. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchung war es darum auch explorativ zu untersuchen, ob die Navigationsstrategien mit solchen überdauernden Faktoren wie Persönlichkeit zusammenhängen.

Hypothesenherleitung

Aufgrund der Ergebnisse in den ersten beiden Studien wird angenommen, dass anders als in anderen Studien (Korol, 2004; Korol et al., 2004; Schmitzer-Torbert, 2007) einer internalen Strategie ein allozentrisches Referenzsystem zugrundeliegt, einer externalen dagegen ein egozentrisches.

Hypothese 1: Die Wahl einer externalen Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth hängt mit der Bevorzugung eines egozentrischen räumlichen Referenzsystems in einer Tunnelaufgabe zusammen.

Hypothese 2: Die Wahl einer internalen Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth hängt mit der Bevorzugung eines allozentrischen räumlichen Referenzsystems in einer Tunnelaufgabe zusammen.

Männer bevorzugen eher allozentrische Referenzsysteme in Navigationsaufgaben, Frauen dagegen eher egozentrische (z.B. Bever, 1992; Couclelis, 1996; Maguire et al., 1999).

Hypothese 3: Männer wählen im Tunnel häufiger als Frauen ein allozentrisches Referenzsystem.

4.2 Methode

4.2.1 Probandinnen und Probanden

Es nahmen 50 normalsichtige (zum Teil mit korrigiertem Visus) Studierende der Psychologie an diesem Versuch teil und erhielten dafür Versuchspersonenstunden. Das durchschnittliche Alter betrug 21,98 bei einem Range von 18 bis 30 Jahren. Es nahmen 23 männliche Pbn (Durchschnittsalter: 23,3) und 27 weibliche Pbn (Durchschnittsalter: 20,9) an der Studie teil.

Im Durchschnitt hatten die Pbn einen Intelligenzquotienten (ZVT nach Oswald & Roth, 1987) von 115 (SD=15.3). Dies weicht deutlich vom angenommenen Durchschnitts-IQ von 100 ab. Eine Analyse einer (sehr kleinen) Stichprobe von Gymnasiasten zeigte im Mittel jedoch einen IQ von 105.47 (Oswald & Roth, 1987), woran zu sehen ist, dass eine akademische Stichprobe wie in der vorliegenden Studie insgesamt einen etwas höheren IQ aufweist und ferner stammen die Daten der Normierung aus den 1970er Jahren (Oswald & Roth, 1987). Männer und Frauen unterschieden sich nicht in ihrer Intelligenz.

4.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf blieb über alle Pbn konstant: Zu Beginn wurden die Pbn über Ziel und Ablauf der Studie informiert und darauf hingewiesen, dass sie das Experiment jederzeit beenden können. Anschließend bearbeiteten sie den Zahlen-Verbindungs-Test (ZVT) nach Oswald und Roth (1987). Danach bearbeiteten sie die Tunnel-Aufgabe zur Erfassung ihres räumlichen Referenzsystems (Gramann et al., 2005; Gramann et al., 2006, s.a. Abschnitt 4.2.3.2) und füllten anschließend den NEO-FFI (Borkenau & Ostendorf, 1993) aus. Im Anschluss daran durchliefen sie das Virtuelle Labyrinth (vgl. Abschnitt 4.2.3.1), woraufhin sie die Fragebögen zu ihrem strategischen Vorgehen ausfüllten (vgl. Abschnitt 4.2.3.3). Die Gesamtdauer der Untersuchung betrug etwa eine Zeitstunde.

4.2.3 Materialien

4.2.3.1 Virtuelles Labyrinth

Das Virtuelle Labyrinth ist das gleiche, das bereits in Studie 2 verwendet wurde. Hier gab es jedoch keine Kontrollbedingung mehr, in der die Pbn auf einem weißen Strich laufen mussten, da diese Bedingung nur für die funktionelle MR-Messung notwendig war. Das heißt, es gab pro Labyrinth-Trial vier Durchgänge: drei Lerndurchgänge und einen

Testdurchgang. Es mussten von jedem Pbn vier Labyrinth dieser Art durchlaufen werden, das heißt insgesamt 16 Durchgänge. Die Pbn saßen in einem Abstand von 1 m vor einem normalen 15“-Monitor.

Das Labyrinth wies einen symmetrischen Grundriss auf (vgl. Abb. 7) und war von vier gut sichtbaren externen Landmarken umstellt, die jeweils am Ende einer der beiden Hauptachsen standen. Die Pbn konnten sich innerhalb des Labyrinths orientieren und die externen Landmarken nicht zur Orientierung nutzen (internale Strategie) oder die Landmarken in ihre Orientierung mit einbeziehen (externale Strategie). Im Testdurchgang, das heißt im jeweils vierten Durchgang wurde die Startposition der Pbn verändert. Diejenigen, die dennoch den gleichen Weg einschlugen und nicht bemerkten oder ignorierten, dass sich an dem von ihnen angesteuerten Ziel nicht mehr die gleiche Landmarke befand, nutzten eine internale Strategie unabhängig von den externen Landmarken. Diejenigen, die sich aber an den externen Landmarken orientierten und nun ihre Laufrichtung nach diesen ausrichteten, verwendeten eine externale Strategie.

4.2.3.2 Tunnel

Gramann und Kollegen haben ein Paradigma von Schönebeck et al. (2001) zur Bestimmung individueller räumlicher Referenzsysteme weiterentwickelt (Gramann et al., 2005; Gramann et al., 2006). In dieser Tunnel-Aufgabe nehmen die Pbn auf einem Computerbildschirm eine passive Fahrt durch einen visuell dargebotenen Tunnel wahr, der an einer Stelle einen Bogen macht. Der Tunnel ist recht minimalistisch und artifiziell und bietet keine Möglichkeit sich etwa an Landmarken zu orientieren (Abb. 30), die Bewegung wird allein durch den optischen Fluss (*optic flow*) der Wandsegmente wahrgenommen. Das Anfangssegment (in Abb.31 A) ist immer gerade und parallel zur Ausrichtung des Pbn und bildet somit die Referenzrichtung. Daraufhin folgt ein Kurvensegment (entweder eine Links- oder eine Rechtskurve) in unterschiedlich starker Krümmung (in Abb. 31 B). Nach dem Kurvensegment folgt erneut ein gerades Segment (in Abb.31 C).

Die Aufgabe der Pbn bestand darin, aus zwei nach dem letzten Segment dargebotenen Pfeilen denjenigen auszuwählen, der auf die Startposition des Pbn weist (Heimkehrvektor). Es gibt bei dieser Aufgabe keine im engeren Sinne „richtige“ Antwort. Die Antwort ist je nach Referenzsystem (allozentrisch versus egozentrisch) als richtig zu betrachten. Abbildung 31 soll dies veranschaulichen.

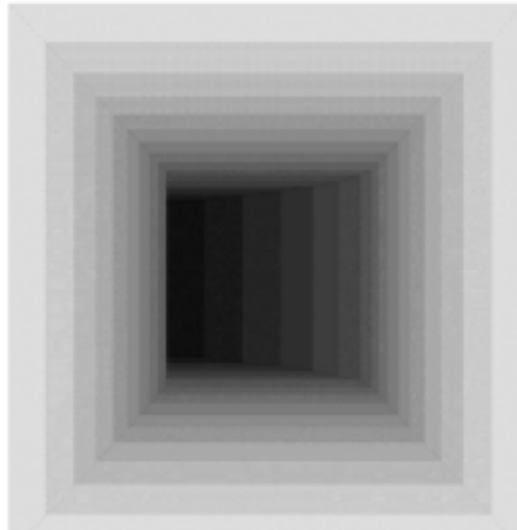


Abb. 30: Blick in den Tunnel, durch den die Pbn in der Tunnelaufgabe nach Gramann und Kollegen gefahren werden, hier mit einer Linkskurve (aus Gramann et al., 2006).

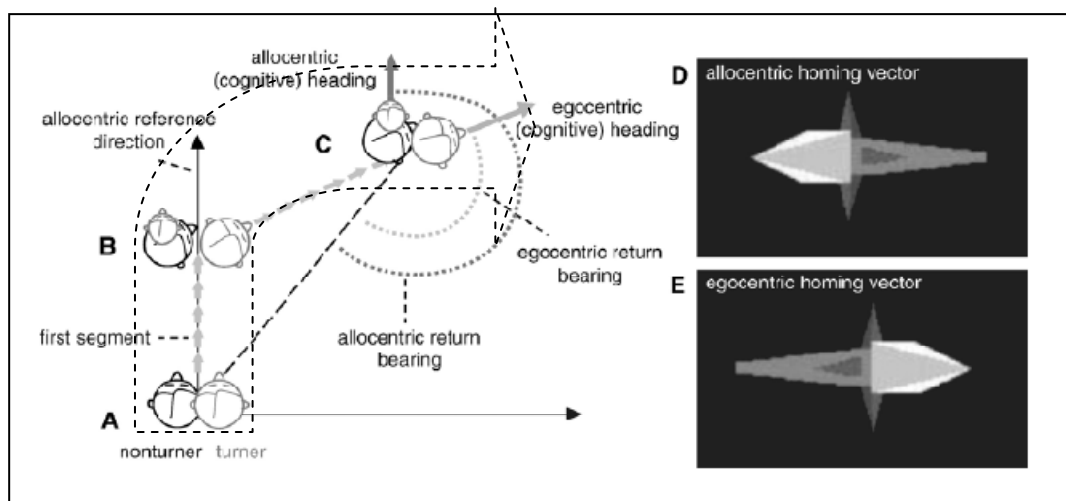


Abb. 31: Erfassung der zwei möglichen Referenzsysteme: Die linke Seite zeigt Pbn zu verschiedenen Zeiten der Tunnelfahrt: am Ausgangspunkt (A), in der Kurve (B) und am Ende (C). Der Verlauf des Tunnels ist als gestrichelter Blockpfeil dargestellt. Der dunkelgraue Kopf stellt die wahrgenommene Kopfrepräsentation eines Non-Turners dar, der kleine hellgraue dessen kognitive Kopfrepräsentation. Die wahrgenommene und die kognitive Kopfrichtung divergiert dabei während der Fahrt.

Rechts vom Non-Turner ist auf der gleichen Strecke in hellgrau ein Turner dargestellt, der ein egozentrisches Bezugssystem nutzt. Der hellgraue Kopf, stellt diesmal sowohl die wahrgenommene als auch die kognitive Repräsentation dar, da angenommen wird, dass diese identisch sind.

Im ersten Segment (A) sind die beiden Repräsentationen sowohl des Turners als auch des Non-Turners identisch. Während der Kurve (B) ändert sich die Orientierungsachse: Am Ende des Tunnels ist die kognitive Kopfausrichtung des Turners unterschiedlich zu der des Non-Turners. Beide wählen daher unterschiedliche Pfeile, die den Ausgangspunkt anvisieren sollen (beispielhaft Pfeile ganz rechts für eine Rechtskurve von 60°: Heimkehrvektor für den Non-Turner [D] und für den Turner [E]) (Abbildung aus Gramann et al., 2006).

Es ist einerseits möglich ein objektives, von der eigenen Person unabhängiges, das heißt allozentrisches Referenzsystem zu verwenden. Dann würde man sich nicht mit der Kurve im Tunnel „mitdrehen“, sondern die Bewertung des Ausgangspunktes anhand des Nullpunktes eines objektiven Koordinatensystems bewerten (Gramann et al., 2005).

Gramann und Kollegen bezeichnen deshalb diese Personen als „Non-Turner“. Bei einer Rechts-Kurve würde man deshalb den Ausgangspunkt links hinter sich vermuten (in Abb. 31 ist der Non-Turner dunkelgrau dargestellt). Innerhalb eines subjektiven, von der eigenen Position und damit auch von einer Drehung abhängigen, egozentrischen Bezugssystems würde es bedeuten, dass man sich im Tunnel „mitdreht“ (Turner) (Gramann et al., 2005). Ein Turner würde nun den Ausgangspunkt nach einer Rechtskurve nicht mehr links hinter sich vermuten, sondern rechts hinter sich (in Abb. 31 ist der Turner hellgrau dargestellt). Aufgrund der unterschiedlichen Wahl des Heimkehrvektors von Turnern und Non-Turnern ist somit eine Kategorisierung der Pbn möglich. Gramann und Kollegen konnten zeigen, dass ein Proband, der einmal „allozentrische Antworten“ gab, in der Regel konsistent immer wieder allozentrisch antwortet (Gramann et al., 2006; Gramann et al., 2005). Sie können damit zuverlässig ihre Pbn in zwei Probandengruppen aufteilen, in Personen mit stabilen egozentrischen oder allozentrischen Antwortmustern. Allerdings haben Gramann und Kollegen bisher nur männliche Probanden getestet. In der Kategorisierungsaufgabe, die hier verwendet wurde, war immer nur eine Kurve pro Tunnel enthalten

4.2.3.3 Strategiefragebögen

Es wurden dieselben Navigationsstrategiefragebögen verwendet wie bereits in Studie 2: der maze-Fragebogen (maze-FB), die Alltags-Strategie-Skala (ASS) mit den beiden Subskalen Routenstrategie und Orientierungsstrategie (Lawton, 1994, deutsch nach Fitting, 2002; Fitting et al., 2001) und die deutsche Version des Fragebogens zu den räumlichen Repräsentationen (dQSR; Pazzaglia & De Beni, 2001, deutsch von Stefan Münzer, Klaus Gramann, und Christoph Hölscher) mit den Faktoren Orientierungsbeziehungswise Richtungssinn (*sense of direction*), Überblick versus Landmarken, Kardinale Richtungen, (verbale) Routenbeschreibungen und Routenerinnern (vgl. Abschnitt 3.2.4.2).

4.2.3.4 NEO-FFI

Zur validen Erfassung von Persönlichkeitseigenschaften wurde den Pbn das NEO-Fünf-Faktoren Inventar (NEO-FFI) nach Costa und McCrae (1992; deutsch: Borkenau & Ostendorf, 1993) vorgelegt. Dieser Fragebogen beruht auf den „Big Five“ der Persönlichkeit. Hinweise für die Stimmigkeit der Big Five ergeben sich aus faktorenanalytischen Studien (z.B. Digman, 1990). Diese faktorenanalytischen Studien beruhen auf dem psycho-lexikalischen Ansatz. Der psycho-lexikalische Ansatz geht

davon aus, dass das gesamte Spektrum menschlicher Persönlichkeitsausprägung in der Sprache repräsentiert ist. Das wiederum bedeutet, dass man alle Eigenschaftswörter einer Sprache, die das zwischenmenschliche Zusammenleben betreffen, zu Faktoren zusammenfassen kann. Es bilden sich bei Faktorenanalysen immer wieder fünf Faktoren mit ähnlicher Struktur heraus (Ostendorf, 1990). Somit kann die Fünf-Faktoren-Struktur als relativ robust angesehen werden (Borkenau & Ostendorf, 1993). Die Namensgebung für diese Faktoren ist nicht immer ganz einheitlich und nicht unumstritten. Da der NEO-FFI im deutschsprachigen Raum das anerkannteste Verfahren zur Erfassung der Big Five ist, werden auch dessen Konnotationen hier verwendet. Inhaltlich ist der Big-Five-Ansatz nicht ohne Kritik geblieben, für die Belange der vorliegenden Studie ist dies jedoch erst einmal zweitrangig (vgl. dazu aber z.B. Block, 1995; Eysenck, 1967).

Ausgewertet wird der NEO-FFI, indem die einzelnen Ratingwerte (von 1 bis 5) jedes Items pro Skala zusammengezählt und durch die Anzahl der gültigen Antworten geteilt wird, wobei beachtet werden muss, dass einige Items umzupolen sind.

4.2.3.5 Zahlenverbindungstest (ZVT)

Zur Abklärung, dass nicht etwa Intelligenzunterschiede für die unterschiedliche Verwendung von bestimmten Navigationsstrategien verantwortlich sind, wurde der Zahlenverbindungstest (ZVT) eingesetzt (Oswald & Roth, 1987), der nicht Intelligenz im engeren Sinne, sondern die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit misst. Im Vergleich mit anderen anerkannten Intelligenztests zeigten sich durchweg signifikante Zusammenhänge mit dem ZVT (r_{tt} zwischen .43 und .83, je nach Test, Schul- oder Altersstufe) (Oswald & Roth, 1987), weswegen dieser als recht valides und dabei sehr ökonomisches Intelligenzdiagnostikum angesehen werden kann, wenngleich der Generalfaktor der Intelligenz g in der Regel als aus mehr Komponenten als einer reinen Verarbeitungsgeschwindigkeit zusammengesetzt angesehen wird.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Zusammenhang Referenzsysteme und Navigationsstrategien

Anders als bei Gramann et al. (2005) haben in dieser Studie einzelne Pbn nicht konsistent immer nur ein Referenzsystem im Tunnel bevorzugt. Dies erschwert die eindeutige Zuordnung einzelner Pbn zu einem bestimmten Referenzsystem. Darum wurde hier erneut ein Koeffizient gebildet, der mit dem c_{nav} aus Studie 1 vergleichbar ist (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Dieser Koeffizient repräsentiert das Ausmaß des primär bevorzugten Referenzsystems und wird im Folgenden mit c_{Ref} bezeichnet. Die Formel für c_{Ref} lautet:

$$c_{Ref} = \frac{Choice_{allo} - Choice_{ego}}{30}$$

c_{Ref} : Referenzsystemskoeffizient
 Choice_{allo}: Häufigkeit der Wahl des „allozentrischen Heimkehrvektors“
 Choice_{ego}: Häufigkeit der Wahl des „egozentrischen Heimkehrvektors“

Der Referenzsystemkoeffizient c_{Ref} pro Pb ergibt sich somit aus der Differenz der Häufigkeit einer Wahl desjenigen Pfeiles, der ein allozentrisches Referenzsystem nahelegt (Non-Turner) und der Häufigkeit einer Wahl des Pfeiles, der ein egozentrisches Referenzsystem nahelegt (Turner), geteilt durch die Anzahl aller Durchgänge (30). Somit kann c_{Ref} einen Wert zwischen + 1 und - 1 einnehmen. Ein hoher positiver Wert bedeutet dabei, dass ein allozentrisches Referenzsystem nahegelegt werden kann, das heißt dass es sich bei dem Pbn primär um einen Non-Turner handelt, ein hoher negativer Wert dagegen, dass es sich um einen Turner handelt. Ein Wert um Null herum bedeutet, dass die Wahl einer Antwort offenbar eher zufällig stattgefunden hat.

Es ist neben der Berechnung von c_{Ref} auch möglich, eine nominale Zuordnung zu einer Gruppe von Pbn mit der Bevorzugung eines bestimmten räumlichen Referenzsystems vorzunehmen. Dabei wurden nur Pbn, die bei mehr als 60 % ihrer Antworten konsistent blieben, eindeutig einer Gruppe zugeordnet, die anderen wurden nicht zugeordnet. Diese lagen zu nahe an einer zufälligen Wahl (50%).

Insgesamt ergab sich ein mittlerer c_{Ref} von -0.168, das heißt es wählten mehr Pbn ein egozentrisches Referenzsystem als ein allozentrisches. Das gleiche zeigt sich bei der nominalen Gruppenzuordnung, hiernach wählten 26 Pbn ein egozentrisches, aber nur 16 Pbn ein allozentrisches Referenzsystem. 8 Pbn waren zu inkonsistent in ihrem Antwortverhalten.

Im Virtuellen Labyrinth war die internale Strategie die beliebtere: Es wählten 26 Pbn eine internale Strategie und nur 17 Pbn eine externale. Hier konnten 7 Pbn keiner bestimmten Strategie zugeordnet werden.

Um nun einen Zusammenhang zwischen dem gewählten Referenzsystem und der Strategiewahl im Labyrinth zu errechnen, wurde ein t-Test gerechnet, bei dem die Strategiewahl im Labyrinth als unabhängige Variable fungierte, c_{Ref} als abhängige. Dabei muss erwähnt werden, dass erneut nur diejenigen Pbn einer bestimmten Navigationsstrategie zugeordnet wurden, wenn sie im Verlaufe des Versuchs ihre Strategie nicht einmal änderten.

Die beiden Gruppen (externale Strategie versus interne Strategie) unterschieden sich nicht in der Höhe ihres Koeffizienten (vgl. Abb. 32). Pbn mit einer externen Strategie ($n=17$) hatten im Mittel einen c_{Ref} von -0.105 ($SD=.78$), Pbn mit einer internen Strategie ($n=26$) einen von -0.167 ($SD=.72$) [$t_{(41)}=.264$; $p=.793$; n.s.].

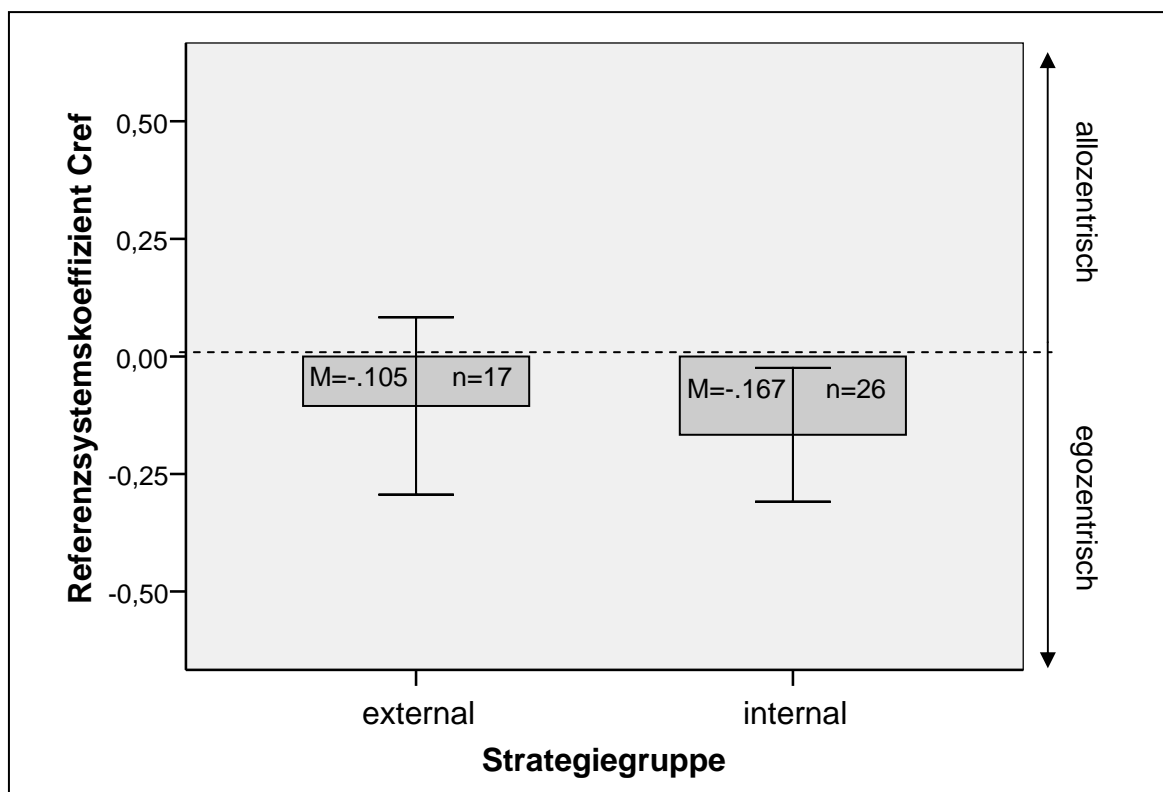


Abb. 32: Mittelwertsvergleich zwischen Pbn mit externaler und interner Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth bezüglich des Referenzsystemskoeffizienten c_{Ref} . Ein positiver Wert bedeutet die Bevorzugung eines allozentrischen Referenzsystems im Tunnel, ein negativer die eines egozentrischen. Fehlerbalken entsprechen ± 1 Standardfehler. Es gibt keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen [$t_{(41)}=.264$; $p=.793$; n.s.].

Anhand der nominalen Zuordnung zu einer Gruppe (allozentrisch versus egozentrisch) wurde ein χ^2 -Test gerechnet. Auch anhand dessen kommt man zu dem Ergebnis, dass die Wahl einer bestimmten Strategie im Labyrinth keinerlei Zusammenhang mit der Wahl eines bestimmten Referenzsystems hat (vgl. Tab.29).

Tab.29: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der Wahl einer bestimmten Navigationsstrategie im Labyrinth und der Wahl eines bestimmten Referenzsystems im Tunnel. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=.05$; $df=1$; $p=.823$		Referenzsystem im Tunnel		Rand- summe
		allozentrisch	egozentrisch	
Strategie- gruppe im Labyrinth	external	6 (5,7)	8 (8,3)	14
	internal	9 (9,3)	14 (13,7)	23
Randsumme		15	22	37

4.3.2 Geschlechtsunterschiede

4.3.2.1 Leistungsparameter

Im Tunnel wurden keine Leistungsparameter verwertet. Im Virtuellen Labyrinth wurden als Leistungsparameter die Fehler und die benötigte Zeit im letzten Lerndurchgang erhoben, sowie im anschließenden Fragebogen die richtige Reproduktion des Labyrinthgrundrisses.

Der Kolmogoroff-Smirnoff-Test auf Normalverteilung wird für diese Daten signifikant, so dass diese nicht als normalverteilt angenommen werden können. Abbildung 33 verdeutlicht, dass es einige extreme Ausreißerwerte vor allem in der Gruppe der Frauen gibt, weswegen die Normalverteilung nicht als gegeben angenommen werden kann. Damit kann kein t-Test auf Mittelwertsdifferenzen gerechnet werden.

Es wurde der nicht-parametrische U-Test nach Mann und Whitney gerechnet. Die Männer weisen bei den Fehlern einen Median von 0, sowie bei der Dauer im letzten Lerndurchgang einen Median von 21,38 s auf. Die Frauen weisen bei den Fehlern einen Median von 2,0, sowie bei der Dauer im letzten Lerndurchgang einen Median von 24,61 s auf. Daran kann man bereits sehen, dass die Männer weniger Fehler, bei kürzerer Bearbeitungsdauer machten. Der entsprechende U-Test wird für die Fehler im letzten Lerndurchgang zwar nicht signifikant, weist aber eine gewisse Tendenz auf [U=241; z=1.46; p=.072]. Für die Durchlaufdauer im letzten Durchgang wird der Unterschied signifikant [U=198; z=2.19; p<.05]. Männer waren somit etwas besser, besonders schneller im Virtuellen Labyrinth als Frauen.

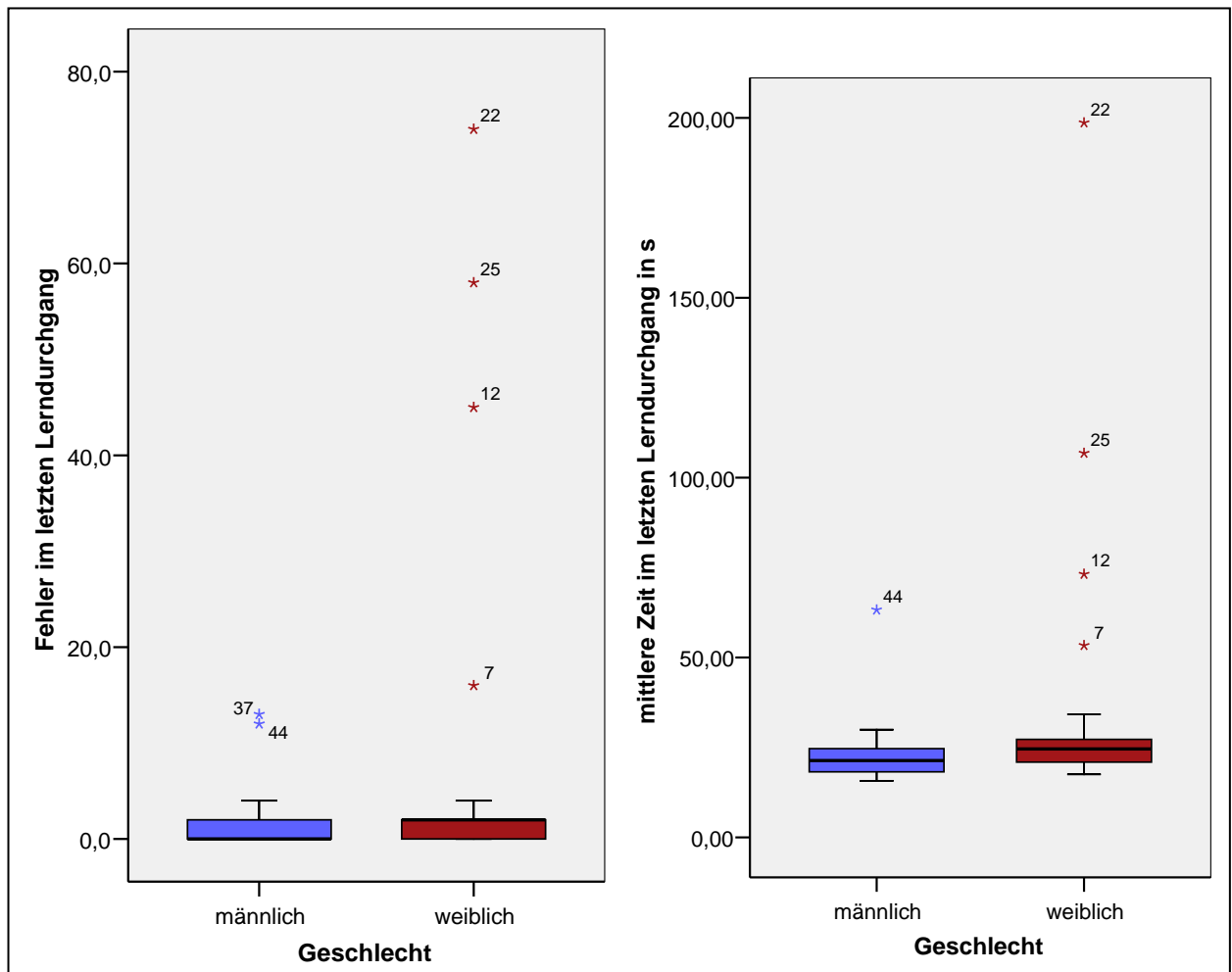


Abb. 33: Boxplot Ergebnisse Leistungen im Labyrinth nach Geschlecht. Links: Mittlere Anzahl Fehler im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Frauen ($n=27$) machten mehr Fehler ($Med=2,0$) als Männer ($n=23$) ($Med=0,0$). Rechts: Mittlere benötigte Zeit in Sekunden im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Männer durchliefen den letzten Durchgang etwas schneller ($Med=21,38$ s) als Frauen ($Med=24,61$ s). Etwa sechs Pbn machten übermäßig viele Fehler im letzten Lerndurchgang, etwa fünf waren besonders langsam.

Männer gaben nach dem Durchlaufen des Virtuellen Labyrinths signifikant häufiger als Frauen den Grundriss des Labyrinths richtig wieder [$\chi^2=3.69$; $df=1$; $p=.055$] (vgl. Tab.30). Die Entscheidung, ob ein Grundriss als richtig oder falsch wiedergegeben eingeschätzt wurde, folgt dem Vorgehen der ersten beiden Studien (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

Tab.30: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Geschlechter. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=3.69$; $df=1$; $p=.055$		Geschlecht		Randsumme
		Männer	Frauen	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	Ja	10 (6,9)	5 (8,1)	15
	Nein	13 (16,1)	22 (18,9)	35
Randsumme		23	27	50

4.3.2.2 Navigationsstrategien

Männer und Frauen unterschieden sich nicht in ihrer Wahl der Navigationsstrategien im Virtuellen Labyrinth: Ein χ^2 -Test zeigt eine der erwarteten Verteilung entsprechende Verteilung von Männern und Frauen auf die Strategiegruppen [$\chi^2 = .322$, $df=1$, $p=.571$] (vgl. Tab.31).

Tab.31: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung (χ^2 -Test) von Navigationsstrategie zum Geschlecht. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2 = .322$, $df=1$, $p=.571$		Im Labyrinth gewählte Strategie		Randsummen
		external	internal	
Geschlecht	männlich	7 (7,9)	13 (12,1)	20
	weiblich	10 (9,1)	13 (13,9)	23
Randsummen		17	26	43

Es zeigten sich allerdings Geschlechtsunterschiede in den Strategien, welche durch Fragebögen erfasst wurden, wengleich nur in der Routenskala der ASS und tendenziell auf dem Routenfaktor der dQSR. Auf der Routenskala der ASS schätzten sich Frauen ($M=3.83$; $SD=.50$) signifikant höher ein als Männer ($M=3.55$; $SD=.46$) [$t_{(48)}=2.01$; $p=.025$; $d=.58$]. Ebenso auf dem Routenfaktor des dQSR: Frauen ($M=3.87$; $SD=.81$) schätzten sich höher ein als Männer ($M=3.54$; $SD=.81$), wengleich nicht signifikant [$t_{(47)}=1.39$; $p=.09$; n.s.] (vgl. Tab.32).

Tab.32: Mittelwerte (und Standardabweichung) der Selbsteinschätzung der Strategien in den Strategiefragebögen nach Geschlechtern, sowie die t-Werte (mit Signifikanzwert p) zu den Geschlechtsunterschieden. Die Mittelwerte der signifikanten Unterschiede ($p=.05$) sind fett gedruckt. (SoD=*sense of direction*=Orientierungssinn).

Fragebogen	Subskala	Männer (n=23) M (SD)	Frauen (n=27) M (SD)	t-Wert des Mittelwertsvergleichs Männer - Frauen	p-Wert
Maze-Fragebogen	external	3.00 (1.13)	3.27 (1.14)	-.831	.205
	internal	3.72 (1.06)	3.49 (1.31)	.675	.252
Alltags-Strategieskala	Route	3.55 (.46)	3.83 (.50)	-2.01	.025
	Orientierung	2.59 (.58)	2.57 (.72)	.121	.452
dQSR (Fragebogen zu räuml. Repräsentationen) deutsche Faktoren	SoD	2.89 (.85)	2.86 (.90)	.101	.460
	Überblick	2.59 (.93)	2.34 (1.00)	.902	.186
	Richtungen	2.54 (.99)	2.18 (.97)	1.27	.145
	Routen (verbal)	2.74 (1.09)	2.96 (1.21)	-.674	.252
	Routen	3.54 (.81)	3.87 (.81)	-1.39	.086

4.3.2.3 Räumliche Referenzsysteme

Männer und Frauen unterschieden sich in der Präferenz ihrer räumlichen Referenzsysteme: Männer wiesen einen signifikant niedrigeren c_{Ref} auf ($M=-.367$; $SD=.71$) als Frauen ($M=.002$; $SD=.71$) [$t_{(48)}=1.84$; $p=.036$; $d=.52$], das heißt sie präferierten im Mittel signifikant häufiger als Frauen ein egozentrisches Bezugssystem (vgl. Abb. 34). Die Frauen bevorzugten demgegenüber genauso oft ein egozentrisches Referenzsystem wie ein allozentrisches, da der Wert von c_{Ref} der Frauen im Mittel um Null herum liegt.

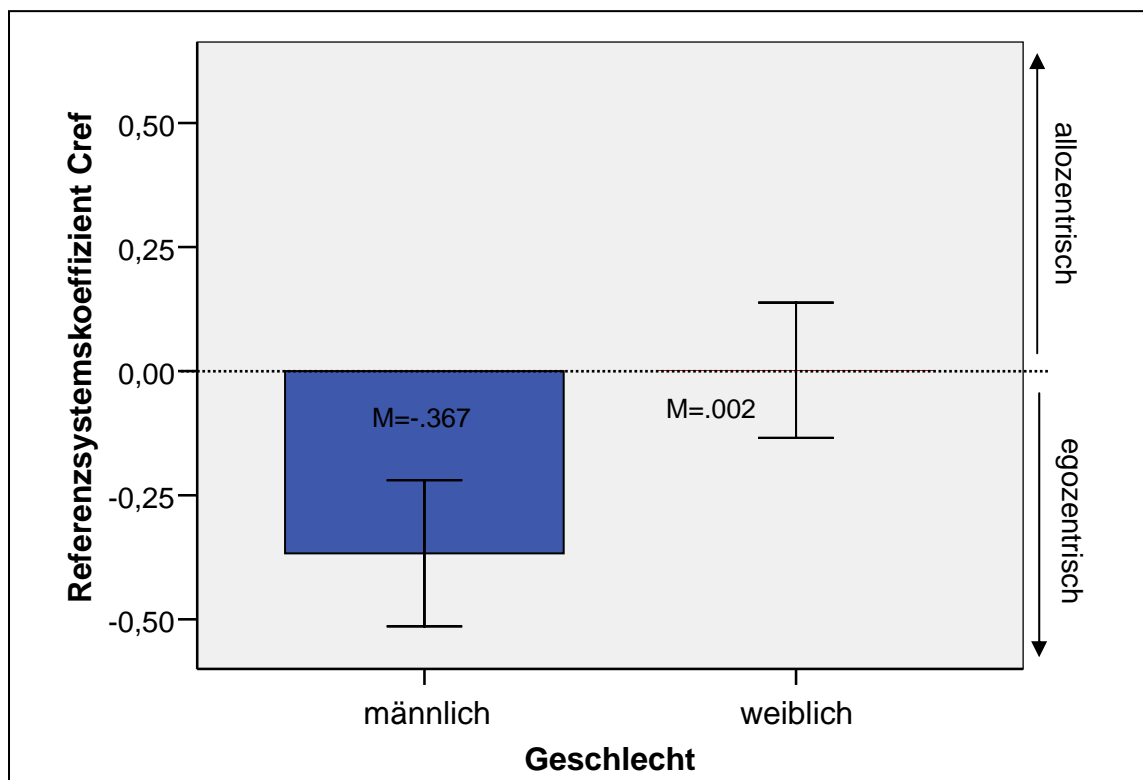


Abb. 34: Mittelwertsvergleich zwischen Männern und Frauen bezüglich des Referenzsystemskoeffizienten c_{Ref} . Ein positiver Wert bedeutet die Bevorzugung eines allozentrischen Referenzsystems im Tunnel, ein negativer die eines egozentrischen. Fehlerbalken entsprechen 1 Standardfehler. Beide Geschlechter unterscheiden sich signifikant [$t_{(48)}=1.84$; $p=.036$; $d=.52$].

Letzteres lässt sich auch anhand der nominalen Gruppenzuordnung darstellen. Es wurde dafür ein χ^2 -Test gerechnet. Bei diesem wird der Geschlechterunterschied zwar nicht mehr signifikant [$\chi^2=2.30$, $df=1$, $p=.13$], aber es wird deutlich, dass die Frauen sich gleichmäßig auf beide Gruppen verteilen, während sich bei den Männern eine Tendenz hin zu einem egozentrischen Referenzsystem zeigt (vgl. Tab.33).

Tab.33: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung (χ^2 -Test) der Präferenz eines bestimmten räumlichen Referenzsystems in der Tunnelaufgabe in Bezug auf das Geschlecht. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

		Räumliches Referenzsystem (Tunnelaufgabe)		Randsummen
		Allozentrisch	Egozentrisch	
Geschlecht	männlich	6 (8,4)	16 (13,6)	22
	weiblich	10 (7,6)	10 (12,4)	20
Randsummen		16	26	42

4.3.3 Unterschiede aufgrund der Navigationsstrategie

4.3.3.1 Leistungsparameter

Die beiden Navigationsstrategiegruppen im Virtuellen Labyrinth (external versus internal) unterschieden sich in ihrer Leistung im Labyrinth, vor allem in der Zeit, die sie im letzten Lerndurchgang benötigten (vgl. Abb. 35). Da wie oben bereits erwähnt die Daten insgesamt nicht normalverteilt sind, wurde ein U-Test nach Mann und Whitney gerechnet.

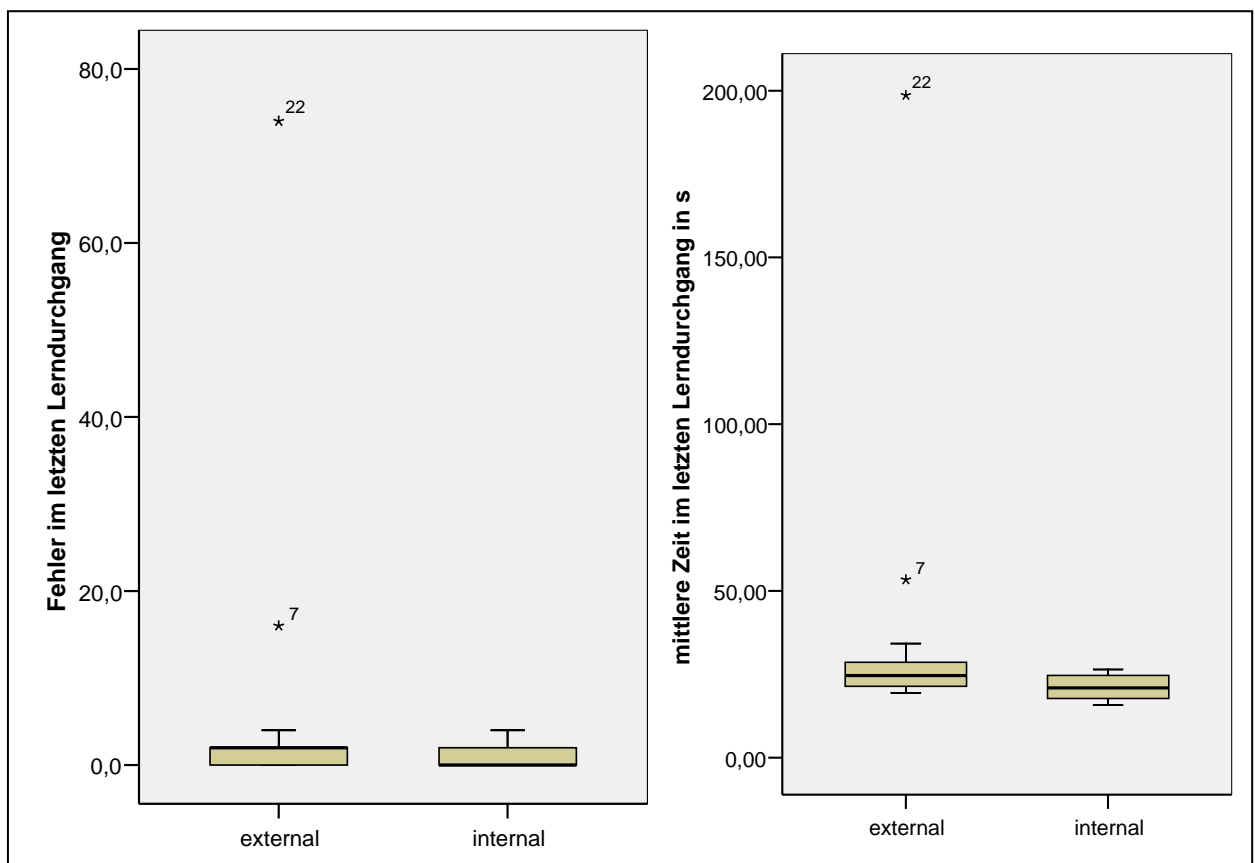


Abb. 35: Boxplot Ergebnisse Leistungen im Labyrinth nach Strategiegruppe im Virtuellen Labyrinth. Links: Anzahl Fehler im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Pbn mit externaler Strategie ($n=17$) machten mehr Fehler ($Med=2,0$) als Pbn mit internaler Strategie ($n=26$) ($Med=0,0$). Rechts: Mittlere benötigte Zeit in Sekunden im letzten Lerndurchgang (Durchgang 3). Pbn mit internaler Strategie durchliefen den letzten Durchgang schneller ($Med=20,93$ s) als Pbn mit externaler Strategie ($Med=24,61$ s).

Die Gruppe der Pbn mit externaler Navigationsstrategie (n=17) hat einen Medianwert von 2 Fehlern im letzten Lerndurchgang, sowie einen Medianwert von 24,61 s für die Durchlaufdauer im letzten Durchgang. Die Gruppe der Pbn mit internaler Navigationsstrategie weist einen Median von 0 Fehlern und 20,93 s auf. Der Unterschied zugunsten der Gruppe der internalen Navigationsstrategie wird für die Anzahl der Fehler nicht signifikant, weist aber eine gewisse Tendenz auf [U=168.5; z=1.45; p=.073], für die benötigte Zeit im letzten Lerndurchgang wird der Unterschied dagegen signifikant [U=108.0; z=2.81; p<.01]: Pbn mit einer internalen Navigationsstrategie waren somit tendenziell besser und signifikant schneller beim Lösen der Labyrinthaufgabe.

Die beiden Strategiegruppen unterschieden sich demgegenüber nicht darin, wie oft sie den Labyrinth-Grundriss richtig wiedergaben [$\chi^2=2.11$; df=1; p=.146]. Es lässt sich jedoch eine leichte Tendenz feststellen, nach der erneut Pbn mit internaler Strategie etwas häufiger den Grundriss richtig reproduzieren konnten (10 bei erwarteten 7,9) und Pbn mit externaler etwas häufiger als erwartet dazu neigten ihn nicht richtig wiederzugeben (14 bei erwarteten 11,9) (Tab. 34).

Tab.34: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Navigationsstrategiegruppen nach dem Virtuellen Labyrinth. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

		Navigationsstrategie im Labyrinth		Randsumme
		External	Internal	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	3 (5,1)	10 (7,9)	13
	nein	14 (11,9)	16 (18,1)	30
Randsumme		17	26	43

4.3.3.2 Fragebogendaten

Die beiden Navigationsstrategiegruppen unterschieden sich deutlich in ihren Selbsteinschätzungen bezüglich ihrer Strategiepräferenzen in den Fragebögen (vgl. Tab.35). Pbn mit externaler Strategie schätzten sich signifikant höher auf der externalen Skala des Maze-Fragebogens ein (M=4.29; SD=.61) als Pbn mit internaler Strategie (M=2.45; SD=.75) [$t_{(41)}=8.48$; p=.000; d=2.69]. Umgekehrt schätzten sich Pbn mit internaler Strategie signifikant höher auf der internalen Skala ein als Pbn mit externaler Strategie [$t_{(41)}=6.20$; p=.000; d=1.84].

In der Alltags-Strategieskala (ASS) gab es keine Unterschiede zwischen den Gruppen, auch wenn sich Pbn mit internaler Strategie etwas höher auf der Subskala

„Orientierungsstrategie“ einschätzten ($M=2.70$; $SD=.60$) als Pbn mit externaler Strategie ($M=2.42$; $SD=.71$) [$t_{(41)}=1.40$; $p=.085$; n.s.].

Im Fragebogen zu den räumlichen Repräsentationen (dQSR) unterschieden sich die beiden Strategiegruppen allerdings auf nahezu allen Subskalen, mit Ausnahme der Skala „Richtungen“. Pbn mit internaler Navigationsstrategie schätzten sich höher ein als Pbn mit externaler Navigationsstrategie auf der Subskala *sense of direction* (allgemeiner Richtungssinn) ($M_{ext}=2.55$; $SD_{ext}=1.0$; $M_{int}=3.14$; $SD_{int}=.75$) [$t_{(40)}=2.19$; $p=.018$; $d=.67$], der Subskala Überblicksstrategie ($M_{ext}=2.06$; $SD_{ext}=.94$; $M_{int}=2.65$; $SD_{int}=.86$) [$t_{(40)}=2.11$; $p=.021$; $d=.65$], sowie der Subskala Routen ($M_{ext}=3.38$; $SD_{ext}=.91$; $M_{int}=4.0$; $SD_{int}=.69$) [$t_{(40)}=2.50$; $p=.009$; $d=.77$]. Pbn mit externaler Navigationsstrategie schätzten sich dagegen höher auf der Subskala Routen (verbal) ein als Pbn mit internaler ($M_{ext}=3.24$; $SD_{ext}=1.31$; $M_{int}=2.64$; $SD_{int}=.96$) [$t_{(40)}=1.70$; $p=.049$; $d=.52$].

Tab.35: Mittelwerte (und Standardabweichungen) der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit der verwendeten Strategie im Virtuellen Labyrinth, sowie die t-Werte (mit Signifikanzwert p) zu den Unterschieden zwischen Pbn mit externaler und internaler Strategie im Labyrinth („Switcher“ sind nicht berücksichtigt) ($N=42$, bzw. beim dQSR: $N=41$). Die Mittelwerte der signifikanten Unterschiede sind fett gedruckt. (SoD=*sense of direction*=Richtungssinn)

Fragebogen	Subskala	Externale (n=17) M (SD)	Internale (n=25) M (SD)	t-Wert des Mittelwertsvergleichs external – internal	p-Wert
Maze-Fragebogen	external	4.29 (.61)	2.45 (.75)	8.48	.000
	internal	2.73 (1.03)	4.33 (.67)	-5.69	.000
Alltags-Strategieskala	Route	3.80 (.55)	3.67 (.49)	.767	.224
	Orientierung	2.42 (.71)	2.70 (.60)	-1.40	.085
dQSR	SoD	2.55 (1.00)	3.14 (.75)	-2.19	.018
	Überblick	2.06 (.94)	2.65 (.86)	-2.11	.021
(Fragebogen zu räuml. Repräsentationen) deutsche Faktoren	Richtungen	2.08 (1.06)	2.45 (.98)	-1.18	.122
	Routen (verbal)	3.24 (1.31)	2.64 (.96)	1.70	.049
	Routen	3.38 (.91)	4.00 (.69)	-2.50	.009

4.3.4 Unterschiede aufgrund des Referenzsystems

4.3.4.1 Leistungsparameter

Die beiden nominal zugeordneten Gruppen (allozentrisches versus egozentrisches Referenzsystem) unterschieden sich nicht in ihren Leistungen im Virtuellen Labyrinth (vgl. Tab. 36). Aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Daten wurde erneut ein U-Test nach Mann und Whitney gerechnet. Beide Gruppen hatten einen Medianwert von 0 Fehlern im letzten Lerndurchgang. Die Gruppe mit dem allozentrischen Referenzsystem wies bezüglich der Durchlaufzeit im letzten Lerndurchgang einen Medianwert von 21,06

s auf, die Gruppe mit egozentrischem Referenzsystem dagegen einen Medianwert von 24,14 s. Der U-Test wird weder für die Fehlerzahl [$U=185.5$; $z=.65$; $p=.257$], noch für die Durchlaufdauer [$U=172.0$; $z=.93$; $p=.176$] signifikant. Das heißt, beide Gruppen waren gleich gut im Lösen der Labyrinthaufgabe.

Tab.36: Deskriptive Statistiken Leistungsparameter nach Referenzsystem, mit Inferenzstatistik Gruppenvergleich (U-Test).

	Anzahl Fehler im Labyrinth (Median)	U-Wert	Mittlere Durchlaufzeit in s im Labyrinth (Median)	U-Wert
Allozentrisch (n=16)	0.00	185.5 (p=.257)	21.06	172.0 (p=.176)
Egozentrisch (n=26)	0.00		24.14	

Es findet sich entsprechend auch keine Korrelation zwischen Fehlern im dritten Lerndurchgang des Virtuellen Labyrinths und dem Koeffizienten c_{Ref} ($r=.032$; $p=.826$; n.s.) oder zwischen der Durchlaufdauer in s und c_{nav} ($r=.036$; $p=.805$).

Auch in der richtigen Reproduktion des Labyrinthgrundrisses unterschieden sich beide Gruppen nicht [$\chi^2=.226$; $df=1$; $p=.636$] (vgl. Tab.37).

Tab.37: Kreuztabelle. Häufigkeitsverteilung der richtigen Wiedergabe des Labyrinth-Grundrisses auf die Referenzsystemgruppen nach der Tunnel-Aufgabe. In Klammern stehen die erwarteten Häufigkeiten.

$\chi^2=.226$; $df=1$; $p=.636$		Referenzsystem im Tunnel		Randsumme
		Allozentrisch (N=16)	Egozentrisch (n=26)	
Labyrinth-Grundriss richtig reproduziert	ja	5 (5,7)	10 (9,3)	15
	nein	11 (10,3)	16 (16,7)	27
Randsumme		16	26	42

Verwendet man statt der nominalen Zuordnung zu einer Gruppe den oben bereits eingeführten Koeffizienten c_{Ref} so lässt sich ein t-Test rechnen, in dem die richtige Wiedergabe des Grundrisses die UV darstellt und c_{Ref} die AV. Hierbei zeigt sich entsprechend dem χ^2 -Test kein Unterschied zwischen den Gruppen: Die Gruppe, derer, die den Grundriss richtig reproduziert haben (n=15), hat im Mittel einen c_{Ref} von $-.301$ (SD=.75), die andere Gruppe (n=35) einen von $-.111$ (SD=.71) [$t_{(48)}=.848$; $p=.201$; n.s.].

4.3.4.2 Fragebogendaten

Die beiden Gruppen anhand der Referenzsysteme (nominale Zuordnung) unterschieden sich auf keiner einzigen Subskala der Navigationsstrategiefragebögen (vgl. Tab.38).

Tab.38: Mittelwerte (und Standardabweichungen) der Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen im Zusammenhang mit den verwendeten Referenzsystemen in der Tunnel-Aufgabe, sowie die t-Werte (mit Signifikanzwert p) zu den Unterschieden zwischen Pbn mit allozentrischem und egozentrischem Referenzsystem im Tunnel (Pbn mit wechselnden Referenzsystem sind nicht berücksichtigt) (N=42). Es gibt keinen signifikanten Unterschied (SoD=*sense of direction*=Richtungssinn)

Fragebogen	Subskala	Allozentrisch (n=16) M (SD)	Egozentrisch (n=25) M (SD)	t-Wert des Mittelwerts- vergleichs allozentrisch – egozentrisch	p- Wert
Maze-Fragebogen	external	2.96 (1.07)	3.19 (1.15)	-.648	.261
	internal	3.65 (1.13)	3.74 (1.13)	-.271	.394
Alltags- Strategieskala	Route	3.66 (.48)	3.68 (.52)	-.144	.443
	Orientierung	2.51 (.52)	2.66 (.73)	-.704	.243
dQSR (Fragebogen zu räuml. Repräsentationen) deutsche Faktoren	SoD	2.83 (.83)	3.06 (.79)	-.897	.188
	Überblick	2.42 (.93)	2.52 (.97)	-.321	.375
	Richtungen	2.25 (1.03)	2.45 (.95)	-.651	.260
	Routen (verbal)	3.06 (1.22)	2.80 (1.10)	.714	.240
	Routen	3.66 (.65)	3.76 (.86)	-.414	.341

4.3.5 Navigationsstrategien und Persönlichkeit

In den Persönlichkeitsdimensionen unterschieden sich die beiden Navigationsstrategiegruppen im Virtuellen Labyrinth nicht (vgl. Tab.39), allenfalls auf der Skala „Verträglichkeit“ zeigte sich ein tendenzieller Unterschied zwischen Pbn mit internaler Strategie (M=3.83; SD=.57) und Pbn mit externaler Strategie (M=3.53; SD=.56) [$t_{(41)}=1.73$; $p=.09$; n.s.], insofern als Pbn mit internaler Strategie sich als etwas verträglicher einschätzten.

Die beiden Strategiegruppen derer, die eine interne und eine externe Navigationsstrategie präferierten, unterschieden sich ebenfalls nicht in ihrer Intelligenz nach dem ZVT ($M_{\text{ext}}=111.6$; $SD_{\text{ext}}=15.2$; $M_{\text{int}}=117.9$; $SD_{\text{int}}=15.4$) [$t_{(41)}=1.33$; $p=0.192$; n.s.].

Tab.39: Deskriptive Ergebnisse für beide Strategiegruppen (external versus internal) auf den fünf Persönlichkeitsdimensionen des NEO-FFI, daneben die Inferenzstatistik (t-Test) für den Mittelwertsvergleich zwischen beiden Gruppen.

Skala des NEO-FFI	Externale Mittelwert (SD)	Internale Mittelwert (SD)	t-Wert des Mittelwertsvergleichs zwischen beiden Strategiegruppen	p- Wert
Neurotizismus	2.62 (.70)	2.73 (.59)	-.573	.570
Extraversion	3.33 (.57)	3.55 (.54)	-1.23	.225
Offenheit für Erfahrungen	3.80 (.48)	3.80 (.53)	-.022	.982
Verträglichkeit	3.53 (.56)	3.83 (.57)	-1.73	.091
Gewissenhaftigkeit	3.63 (.59)	3.44 (.71)	.930	.358

4.3.6 Ergebniszusammenfassung

Es ließ sich entgegen der Hypothesen kein Zusammenhang zwischen der Wahl eines bestimmten räumlichen Referenzsystems und einer Präferenz für eine bestimmte Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth feststellen.

Männer waren etwas besser im Virtuellen Labyrinth als Frauen. Zwar machten sie nur tendenziell weniger Fehler als Frauen im Labyrinth, durchliefen dieses aber signifikant schneller. Außerdem gaben Männer nach dem Durchlaufen des Virtuellen Labyrinths signifikant häufiger als Frauen den Grundriss des Labyrinths richtig wieder.

Dagegen unterschieden sich die Geschlechter nicht in ihrer Präferenz für eine bestimmte Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth. In den Strategiefragebögen dagegen fand sich ein Geschlechtsunterschied in der Selbsteinschätzung: Frauen schätzten sich signifikant höher als Männer auf der Skala Routenstrategie der ASS ein. Männer präferierten häufiger als Frauen ein egozentrisches räumliches Referenzsystem im Tunnel. Dies ist hypothesenkonträr.

Pbn mit einer internalen Navigationsstrategie machten tendenziell weniger Fehler und waren signifikant schneller beim Durchlaufen des Virtuellen Labyrinths. Dagegen unterschieden sich beide Gruppen nicht darin, wie oft sie den Labyrinth-Grundriss richtig wiedergaben.

Die beiden Navigationsstrategiegruppen unterschieden sich in ihren Selbsteinschätzungen bezüglich ihrer Strategiepräferenzen: Pbn mit externaler Strategie schätzten sich signifikant höher auf der externalen Skala des Maze-FB und auf der Subskala Routen (verbal) des dQSR als Pbn mit internaler Strategie ein. Umgekehrt schätzten sich Pbn mit internaler Strategie signifikant höher als Pbn mit externaler Strategie auf der internalen Skala des Maze-FB und auf den Subskalen *sense of direction* (allgemeiner Richtungssinn), Überblicksstrategie und Routen des dQSR ein.

Eine Präferenz für ein bestimmtes räumliches Referenzsystem führt bei keiner einzigen abhängigen Variable, das heißt etwa Fehlern im Labyrinth, Strategiepräferenz im Virtuellen Labyrinth oder Selbsteinschätzung in den Strategiefragebögen zu einem Unterschied zwischen den Gruppen.

4.4 Diskussion

Das Hauptanliegen dieser Studie war es zu klären, inwieweit die im Virtuellen Labyrinth präferierten Navigationsstrategien (externale und internale Strategie) mit räumlichen Referenzsystemen (allozentrisch und egozentrisch) zusammenhängen. Dies ist deswegen von Interesse, da viele Autoren die externale Strategie für eine allozentrische und die internale für eine egozentrische Strategie halten (z.B. Korol, 2004; Levy et al., 2005; Schmitzer-Torbert, 2007; Quinlan et al., 2007), während die Daten der ersten beiden Studien (vgl. Abschnitte 2.3 und 3.3) dieser Arbeit genau Gegenteiliges nahe legten. Somit stellte sich zu Beginn dieser dritten Studie die Frage, welche Interpretation nun die richtige ist: Ist die internale Strategie im Virtuellen Labyrinth eine egozentrische oder eine allozentrische, die räumliches Überblickswissen generiert? Und ist umgekehrt die externale Strategie nun eine allozentrische Strategie oder eine nicht-räumliche Landmarken- und Routen-, das heißt eine eher egozentrische Strategie?

Um dieser Frage nachzugehen wurde ein bereits erprobtes Paradigma von Gramann (z.B. Gramann et al., 2005) zur Differenzierung allozentrischer und egozentrischer Referenzsysteme übernommen, (vgl. Abschnitt 4.2.3.2): die Tunnelaufgabe. Dies ist eine Aufgabe zur Kategorisierung in so genannte *Turner* und *Non-Turner*. Dabei wird davon ausgegangen, dass *Turner* sich mit einer Kurve mitdrehen und sich selbst als Bezugspunkt wahrnehmen, das heißt ein egozentrisches Referenzsystem verwenden und *Non-Turner* eher wie aus der Vogelperspektive auf ein objektives Koordinatensystem schauen, das heißt ihr Wissen allozentrisch repräsentieren. Dadurch dürfte diese Aufgabe zur Erfassung der Verwendung räumlicher Referenzsysteme sehr gut geeignet sein. Gramann und Kollegen konnten zeigen, dass die beiden dadurch extrahierten Gruppen unterschiedliche neuronale Netzwerke aktivieren (Gramann et al., 2006), die zum Beispiel darin mit anderen Autoren übereinstimmen, dass Pbn mit einem egozentrischen Referenzsystem verstärkte parietale Aktivierungen aufweisen.

Wenn man davon ausgeht, dass das hier verwendete Tunnelparadigma zur Erfassung räumlicher Referenzsysteme geeignet ist, so muss an dieser Stelle klar gesagt werden: Weder die eine noch die andere Interpretation bezüglich der beiden empirischen Navigationsstrategien scheint richtig zu sein, da sich in der vorliegenden Studie keinerlei Zusammenhang zwischen dem präferierten räumlichen Referenzsystem und der bevorzugten Strategie im Virtuellen Labyrinth findet.

Die meisten Autoren meinen, dass Überblickswissen allozentrisch und Routenwissen egozentrisch enkodiert wird, aber es gibt auch Autoren, die das anders sehen (Gillner & Mallot, 1998; Herrmann et al., 1998, vgl. auch Abschnitt 1.3.2).

Routenwissen muss nach Ansicht dieser Autoren nicht zwingend egozentrisch repräsentiert werden, sondern kann auch allozentrisch repräsentiert werden: je nach Perspektive (Herrmann et al., 1998; vgl. Abschnitt 1.3.2). Auch Gillner und Mallot (1998) vermuten, dass Routen-, ja sogar Landmarkenwissen sowohl egozentrisch als auch allozentrisch repräsentiert werden kann. Sie nehmen an, dass es zum Beispiel für das Wissen um eine Route ebenso eine egozentrische wie eine allozentrische Repräsentation geben kann: Zum Einen ist es denkbar sich den Blickwinkel, den man einnehmen wird, sobald man eine bestimmte Bewegung gemacht hat, vorzustellen, das heißt einen Blickwinkelgraphen und darum egozentrisch zu repräsentieren.

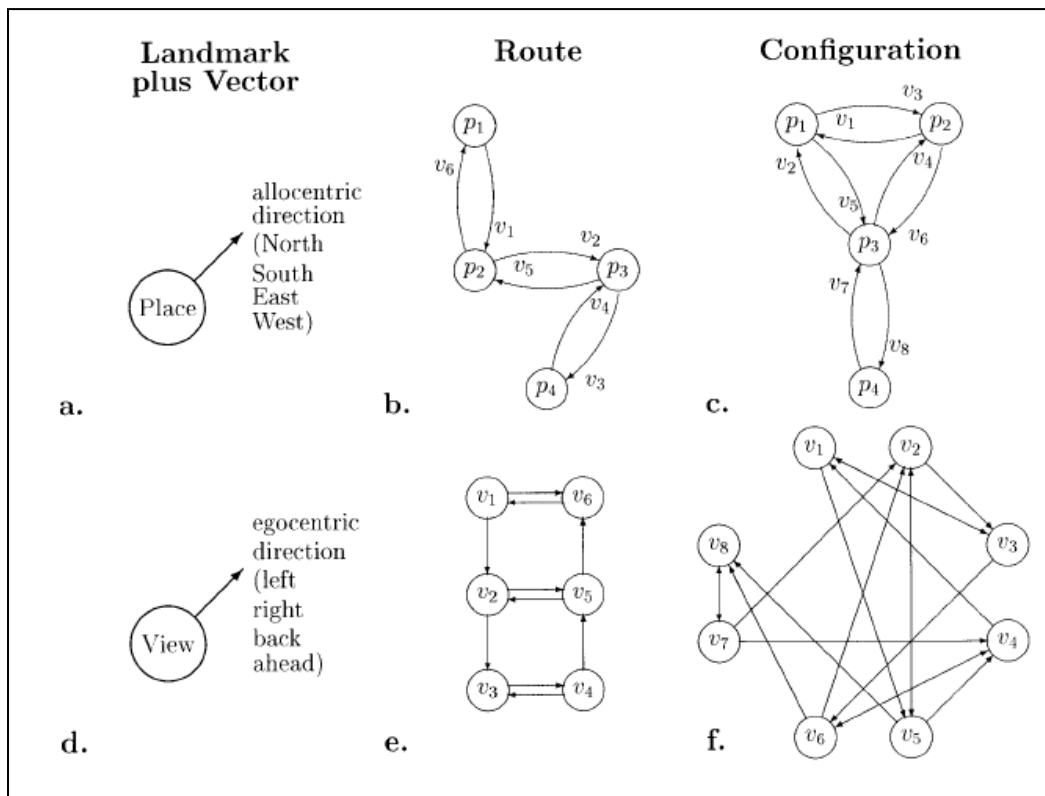


Abb. 36: Der Graphenansatz im Rahmen räumlicher Repräsentationen von Gillner und Mallot (1998). Von links nach rechts werden zunehmend komplexere räumliche Anordnungen dargestellt. Obere Reihe (a-c): Ortsgraphen. Die Knoten sind Orte, die unabhängig von der Körperausrichtung begriffen werden. Die Verbindungen (Pfeile) zwischen diesen übertragen die allozentrische Richtungsinformation. Untere Reihe (d-f): Blickrichtungsgraphen. Die Knoten sind erinnerbare Ansichten (views) oder andere positionale Informationen (zum Beispiel abhängig von der Blickrichtung des Betrachters) und die Pfeile übertragen die Richtungsinformation in Abhängigkeit von der Blickrichtung. Jede Ansicht v_i in e und f korrespondiert mit einer Verbindung in b und c (Abb. aus Gillner & Mallot, 1998).

Zum Anderen ist es aber auch denkbar, einen so genannten Ortsgraphen zu verwenden und zu wissen, wie ein bestimmter Ort mit einem anderen verbunden ist,

unabhängig davon, wo ich mich als Betrachter gerade befinde. Dasselbe gilt im Prinzip auch für Überblickswissen, das dann besser nicht Überblickswissen genannt werden sollte, sondern Konfigurationswissen, da das Wort Überblick schon sehr deutlich eine allozentrische Repräsentation impliziert (vgl. Abb. 36).

Diese Auffassung von Landmarken-, Routen- und Überblickswissen, ebenso wie die konzeptuellen Überlegungen von Herrmann et al. (1998) über die Feld- und Beobachterperspektive bei der Routenrepräsentation erlaubt es anzunehmen, dass alle drei Repräsentationen ganz oder teilweise in gleichen Referenzsystemen repräsentiert werden können, je nach individueller Präferenz oder Darbietungsart. Dann wäre die Interpretation einer Vielzahl von Autoren somit falsch, nämlich dass eine externale Strategie gleich zu setzen sei mit einer allozentrischen und die internale mit einer egozentrischen Strategie (z.B. Korol, 2004; Schmitzer-Torbert, 2007; Levy et al., 2005). Dies wird in Abschnitt 5.1 noch einmal aufgegriffen. Ganz abschließend kann dies wohl aber nicht geklärt werden, dafür wären weitere Untersuchungen notwendig.

Einschränkend muss gesagt werden, dass nicht ganz sicher ist, ob die Tunnelaufgabe sich wirklich zur Operationalisierung räumlicher Referenzsysteme eignet. Letztlich bleibt es Spekulation, ob ein *Turner* ein egozentrisches, ein *Non-Turner* ein allozentrisches Referenzsystem verwendet, auch wenn elektrophysiologische Daten dies stützen.

Ferner gab es ein Problem bei der Erhebung dieser Referenzsysteme: Anders als in den Studien von Gramann und Kollegen (z.B. 2005; 2006) blieben nicht alle Pbn ganz konsistent in „ihrem Referenzsystem“. Immerhin konnten deshalb acht Pbn nicht eindeutig zugeordnet werden. Woran kann das gelegen haben?

Zunächst muss erwähnt werden, dass auch die Arbeitsgruppe um Gramann (mündliche Auskunft, Mai 2008) einzelne Pbn hatte, die nicht konsistent in ihrem Antwortverhalten waren, wenngleich nicht so viele wie in dieser Studie. Diese wurden dann in der Regel nicht weiter in Analysen einbezogen.

Interessanterweise waren unter den inkonsistenten Pbn vor allem Frauen: Sieben Frauen und nur ein Mann lagen mit ihren Antworten nahezu im Ratebereich, das heißt sie wählten zu etwa 50 % den „egozentrischen Pfeil“ und zu etwa 50 % den „allozentrischen“. Man könnte versucht sein zu vermuten, dass vor allem Frauen die Instruktion nicht verstanden haben, wahrscheinlich ist dies hingegen nicht. Es lässt sich zeigen, dass meist Frauen eine höhere räumliche Unsicherheit, beziehungsweise Ängstlichkeit aufweisen (z.B. Lawton, 1994; Schmitz, 1997). Es lässt sich ferner zeigen, dass die bloße Erwartung eine „männliche“, das heißt räumliche Aufgabe lösen zu

müssen bereits zu Leistungseinbußen bei Frauen führen kann (z.B. Wraga et al., 2006), vor allem wenn ein Geschlechtsstereotyp aktiviert wurde (Hausmann et al., in review). Es wäre somit eher plausibel anzunehmen, dass Frauen sich durch eine Aufgabe, in der es um räumliche Orientierung geht, eine vermeintliche Männerdomäne, leichter verunsichern lassen und deswegen weniger konsistent in ihrem Verhalten sind, auch weil sie sich vielleicht keine rechte Mühe geben und tatsächlich nur raten oder übererregt waren. Auf jeden Fall könnte dies auch erklären, warum es bei Gramann et al. (2005; 2006) weniger zu solchen Inkonsistenzen kam: Diese haben nämlich bisher nur männliche Pbn untersucht.

Eher explorativ wurde in dieser Studie der Frage nachgegangen, ob Persönlichkeitseigenschaften einen Einfluss auf die präferierte Navigationsstrategie haben, da einige Autoren zum Beispiel für Lernstrategien einen solchen Einfluss finden (s.o.). Es wäre somit nicht unwahrscheinlich, dass sich das auch für Navigationsstrategien zeigen ließe, auch wenn dies meines Wissens noch nicht untersucht wurde. Dies konnte in dieser Studie nicht gezeigt werden. Die mittels NEO-FFI erfassten Persönlichkeitsdimensionen hingen nicht mit einer bestimmten Präferenz für eine bestimmte Strategie zusammen. Da sich vor allem in der ersten Studie gezeigt hatte, dass die Strategiewahl von den Sexualhormonen moduliert wird, wäre dies auch wiederum erstaunlich, denn man könnte dann versucht sein zu vermuten, dass sich auch die Persönlichkeit über den Zyklus einer Frau verändert. Dies ist aber angesichts der vermuteten Stabilität von Persönlichkeitseigenschaften relativ unwahrscheinlich, weswegen das Ergebnis dieser Studie nicht allzu sehr erstaunt.

5. Allgemeine Diskussion

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse aller drei in dieser Arbeit berichteten Studien zusammenfassend betrachtet und miteinander in Zusammenhang gebracht. Dabei werden die Ergebnisse anhand von drei Themenkomplexen behandelt: Erstens wird es um die Navigationsstrategien und vor allem ihre Konzeptualisierung in diesen und anderen Studien gehen. Zweitens werden Geschlechtsunterschiede nicht nur in räumlichen Leistungen betrachtet, sondern vor allem in Bezug auf Navigationsstrategien und neuronale Aktivierungsunterschiede zwischen den Geschlechtern. Drittens wird der Einfluss der Sexualhormone auf diese zusammenfassend diskutiert.

5.1 Strategiebegriff

Grundlage für alle drei Studien dieser Arbeit waren zwei verschiedene, empirische Navigationsstrategien in einem virtuellen Labyrinth. Diese Strategien wurden erstmals in tierexperimentellen Studien berichtet und zum Teil unter unterschiedlichen Namen auch in Humanstudien. Oft werden die beiden Strategien als *Place Strategy* (~Ortsstrategie) und *Response Strategy* (~Reiz-Reaktions-Strategie) bezeichnet. Als ihr Hauptunterschied wird berichtet, erstere sei eine allozentrische oder räumliche, letztere eine egozentrische oder nicht-räumliche Strategie. Aufgrund einiger Unklarheiten mit dieser Interpretation und der Namensgebung, auf die im Folgenden noch einmal eingegangen werden soll, wurde entschieden, diese beiden Strategien in dieser Arbeit als externe (\triangleq *Place Strategy*) und interne Strategie (\triangleq *Response Strategy*) zu bezeichnen.

Die externe Navigationsstrategie ist eine, bei der sich die Pbn an den externen Hinweisreizen orientieren. Die interne Navigationsstrategie ist demgegenüber eine, bei der sich die Pbn ohne diese externen Hinweisreize orientieren und somit nur anhand von Informationen innerhalb des Labyrinths, beziehungsweise aufgrund einer internen, das heißt mentalen Repräsentation.

Die Ergebnisse bezüglich dieser beiden Strategien in der ersten Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen: Pbn, die eine interne Strategie bevorzugt haben, wiesen höhere Werte auf der Orientierungsskala der Alltags-Strategie-Skala (ASS) auf als Pbn mit externer Strategie und gaben den Labyrinthgrundriss signifikant häufiger richtig wieder als diese. Das heißt, sie haben häufiger ein Überblickswissen generiert. In der zweiten Studie zeigte sich, dass Pbn mit einer internen Strategie dementsprechend höhere Werte auf dem Faktor Überblick des Fragebogens zu räumlichen Repräsentationen (dQSR) aufwiesen. Ferner korrelieren die Werte der Orientierungsskala der ASS mit denen der Skala zur internen Strategie auf dem

Selbsteinschätzungsfragebogen zu den im Labyrinth verwendeten Strategien positiv miteinander. Pbn mit einer externalen Strategie wiesen demgegenüber höhere Werte auf der Routenskala der ASS auf und zudem korrelierte die Selbsteinschätzung bezüglich einer externalen Strategie ebenfalls positiv mit dem Faktor Routenerinnern des dQSR, sowie negativ mit dem Faktor Überblick versus Landmarken des dQSR. In der ersten Studie zeigte sich zudem, dass Pbn mit der vermeintlich räumlichen, allozentrischen externalen Strategie signifikant schlechter im Mentalen Rotationstest waren, das heißt einem Test, der räumliche Fähigkeiten erfasst, als Pbn mit der vermeintlich nicht-räumlichen internalen Strategie.

Das bedeutet zusammenfassend für beide Studien, dass laut der Fragebogendaten die externe Strategie eine Routen- und Landmarkenstrategie ist, während die interne eine Orientierungs- und Überblicksstrategie ist. Dies ist interessanterweise genau konträr zu den Annahmen, die andere Autoren (z.B. Schmitzer-Torbert, 2007; Iaria et al., 2003; Korol, 2004) zu den beiden Strategien anstellen. Diese sehen in einer externalen Strategie (auch: *Place Strategy* oder räumliche Strategie) eine flexiblere, allozentrische Strategie, die räumliches und/oder Überblickswissen generiert. Eine interne Strategie (auch: *Response Strategy* oder nicht-räumliche Strategie) halten sie demgegenüber für ein motorisches Reiz-Reaktions-Lernen und eine egozentrische Strategie, die nicht-metrisches/nicht-räumliches Routenwissen generiert. Tabelle 40 soll dies noch einmal veranschaulichen. Diese sich widersprechenden Befunde waren auch der Grund dafür, dass von den bisherigen Strategiebezeichnungen abgesehen wurde. Die interne Strategie scheint ja zum Beispiel keine reine Reiz-Reaktions-Strategie, das heißt *Response Strategy* zu sein.

Tab.40: Gegenüberstellung von Literatur und Empirie bezüglich der beiden empirisch gefundenen Navigationsstrategien im Virtuellen Labyrinth aufgrund der ersten beiden Studien.

Navigationsstrategie	Literatur	Empirie
Externale Strategie (auch: Place Strategy, räumliche Strategie)	<i>allozentrische</i> Strategie; räumliche Strategie; Generierung von räumlichem und/oder <i>Überblickswissen</i>	kein oder kaum Überblickswissen, eher <i>Routen- und Landmarken-</i> wissen generiert; scheint somit eher <i>egozentrisch</i>
Internale Strategie (auch: Response Strategy, nicht-räumliche Strategie)	<i>egozentrische</i> Strategie; motorisches Lernen; Generierung von nicht- metrischem/nicht- räumlichem <i>Routenwissen</i>	Nutzung räumlichen Wissens wie <i>Orientierung</i> ; eher <i>Überblickswissen</i> generiert; scheint somit eher <i>allozentrisch</i>

Tabelle 40 kann man entnehmen, dass bisher oft davon ausgegangen wurde, die externe Strategie sei eine allozentrische und die interne eine egozentrische. Aufgrund dieser Widersprüchlichkeiten zu den eigenen Daten wurde dies in der dritten Studie

näher untersucht. Es zeigte sich bei der Untersuchung des Zusammenhangs räumlicher Referenzsysteme mit diesen beiden Navigationsstrategien (vgl. Abschnitt 4.3.2) kein Zusammenhang. Das bedeutet, beide Strategien basieren offenbar weder auf einem egozentrischen, noch auf einem allozentrischen Bezugssystem. Bereits in Abschnitt 4.4 wurde erläutert, dass einige Autoren diese einseitige Zuteilung zum Beispiel von Routenwissen zu einem egozentrischen Referenzsystem und somit auch einer internalen Strategie zu eben diesem ablehnen. Sie gehen vielmehr davon aus, dass Routenwissen sowohl ego- als auch allozentrisch repräsentiert werden kann, ebenso wie etwa Konfigurationswissen (z.B. Gillner & Mallot, 1998; Herrmann et al., 1998). Diese Ansicht wird durch die Ergebnisse dieser Studie untermauert.

Es ist auch theoretisch plausibel, dass die Referenzsysteme mit der Art der Repräsentation, das heißt Routen- oder Überblickswissen weniger zu tun haben als meist angenommen: Zu Recht weisen zum Beispiel Ishikawa und Montello (2006) darauf hin, dass in dem Modell von Siegel und White (1975), auf dem die Unterteilung in Routen- und Überblickswissen ja beruht, der Übergang vom nicht-metrischen, das heißt Routenwissen zum metrischen Überblickswissen sehr plötzlich kommt, gewissermaßen ein Quantensprung von der einen zur anderen Stufe. Ebenso erstaunlich ist es, dass ganz plötzlich ein allozentrisches Referenzsystem benutzt wird, welches vorher keine Rolle gespielt hat. Es ist unwahrscheinlich, dass beim Aufbau von räumlichem Wissen alles so klar nach Referenzsystemen getrennt ist. Ein Zusammenspiel beider Systeme wird deshalb von vielen Autoren angenommen (z.B. Maguire et al., 1998), dennoch wird gleichzeitig eine klare Trennung vorgenommen, die von Strategie zu Strategie variiert. Dies zeigt sich nun, ist nicht richtig.

Somit möchte ich die Vorstellung anderer Autoren (z.B. Korol, 2004; Schmitzer-Torbert, 2007; Levy et al., 2005; Quinlan et al., 2007) ablehnen, die externe Strategie (*Place Strategy*) sei eine allozentrische Strategie und die interne (*Response Strategy*) eine egozentrische. Dagegen möchte ich mich Gillner und Mallot (1998) und Herrmann et al. (1998) anschließen und davon ausgehen, dass die Navigationsstrategie unabhängig vom präferierten Referenzsystem ist.

Eine andere Interpretation ist die, dass die externe Strategie eine räumliche, die interne dagegen eine nicht-räumliche, das heißt lediglich Reiz-Reaktionsstrategie sei (z.B. Iaria et al., 2003; Etchamendy & Bohbot, 2007). Dies kann auch abgelehnt werden. Es zeigt sich im Gegenteil, dass gerade die Pbn, die eine interne Strategie präferieren, ein profunderes Abbild (Überblickswissen) des Labyrinths ausbilden als Pbn mit einer externen und bessere Leistungen im Virtuellen Labyrinth (Studie 3) und in anderen

räumlichen Tests wie dem Mentalen Rotationstest (Studie 1) erbringen. Ferner geben sie in Fragebögen signifikant häufiger an Orientierungs-, Richtungs- und Überblicksstrategien zu nutzen, was in der Regel als besonders räumliches Vorgehen angesehen wird, während Pbn mit externaler Strategie eher Landmarken- und Routenstrategien berichten. Dies zeigte sich so auch in der dritten Studie.

Ein interessanter Befund in diesem Zusammenhang betrifft den wohl berühmtesten Amnesiepatienten H.M.. Nachdem ihm der größte Teil des Hippocampus beidseitig operativ entfernt wurde, um ihn von seiner Epilepsie zu heilen, litt er an einer anterograden Amnesie. Das heißt, H.M. war nicht in der Lage, sich an irgendetwas bewusst zu erinnern, das nach seiner Operation oder drei Monate davor passiert ist. Seine Intelligenz aber, seine Sprachfunktionen oder auch das Wissen, das er vor der Operation erworben hatte, waren von diesem Eingriff völlig unbeeinflusst, ebenso sein prozedurales Gedächtnis. Obwohl er also keine neuen deklarativen Gedächtnisinhalte mehr aufbauen konnte, gelang es ihm dennoch eine recht detaillierte Karte seines Apartments zu zeichnen, in das er erst nach seiner Operation gezogen war (vgl. Corkin, 2002). Das ist deshalb bemerkenswert, weil das bedeutet, dass man auch mit rein prozeduralen Wissensstrukturen Überblickswissen von einer Umgebung generieren kann. Das wiederum bedeutet, dass Routenwissen, das oftmals für minderwertig oder zumindest nicht-räumlich gehalten wird, weil es zum Teil eben nur aus automatisierten Reiz-Reaktions-Kombinationen bestünde und also in prozeduraler Form vorliegt, dennoch detailliertes räumliches Wissen produzieren kann. Es ist also möglich durch reines Routenlernen Überblickswissen zu generieren. Damit wären Ansätze wie zum Beispiel von Hartley et al. (2003b) falsch, die davon ausgehen, freie Exploration führe automatisch zu Überblickswissen, während das Lernen einer Route dies nicht täte. Auch hier zeigt sich, dass die bisherigen Interpretationen zu kurz greifen.

Insgesamt ist somit festzuhalten, dass es bei der Beschäftigung mit räumlichen Navigationsstrategien immer wieder zu begrifflichen Schwierigkeiten kommt. Die Strategieunterscheidungen in Routen- und Orientierungsstrategie, in Anlehnung an die verschiedenen Arten räumlicher Wissensrepräsentation, wird m.E. unbotmäßig mit der Unterscheidung in allozentrische und egozentrische Referenzsysteme vermischt. Meistens erläutern die Autoren nicht, wieso sie diese Annahmen machen und gehen offenbar wie selbstverständlich davon aus, dass eine Routenstrategie automatisch eine nicht-metrische und außerdem egozentrische Strategie ist. Die neuronalen Aktivierungsdaten der zweiten Studie zeigen, dass für die interne Strategie tatsächlich Areale aktiviert werden, die eher für eine egozentrische Verarbeitung diskutiert werden.

Ganz offenbar bedeutet dies aber nicht, dass nicht obendrein auch Überblickswissen generiert wird oder ein profundes geometrisches Verständnis für den Aufbau des Labyrinths entwickelt werden kann. Im Gegenteil scheinen Pbn mit internaler Strategie dies eher aufzubauen als Pbn mit externaler Strategie. Zur Verwendung eines egozentrischen Referenzsystems kann es nämlich durchaus gehören, vektorielles Wissen (vgl. Newcombe, 2002), das heißt komplexes räumliches Wissen zu nutzen. Auch auf diese Feinheiten wird in den meisten Arbeiten nicht näher eingegangen. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass ein egozentrisches Referenzsystem unflexibler und nicht-metrisch sei. Dies ist so nicht haltbar.

Eine weitere Schwierigkeit besteht generell darin, dass in verschiedenen Studien Navigationsstrategien auf unterschiedlichste und zum Teil recht willkürliche Art und Weise operationalisiert werden. Oftmals werden Fragebögen verwendet. Diese erfassen aber bei weitem nicht immer die gleichen Konstrukte mit immer den gleichen Kriterien. Aber auch bei anderen Vorgehensweisen werden Strategien recht willkürlich und unterschiedlich operationalisiert, aber auch beschrieben. So werden zum Beispiel Routen- und Orientierungsstrategie unterschieden, Landmarken-, Routen- und Überblicksstrategie, analytische und holistische Strategie, verbale und visuelle, Fünf Faktoren im QSR, räumliche und nicht-räumliche Strategien, *taxic*, *praxic* und *place strategy*, *Place* und *Response Strategy*, egozentrische und allozentrische Strategie... (vgl. Abschnitt 1.3.3) Diese werden zum Teil auch bei gleicher Begrifflichkeit unterschiedlich operationalisiert, in Fragebögen mit unterschiedlichen Fragen, in Morris-Wasserlabyrinthen oder komplexeren Flurlabyrinthen, in denen entweder Texturen oder echte Landmarken als Orientierungshilfe dienen usw.

Dass die beiden verhaltensexperimentell trennbaren Navigationsstrategien nicht eindeutig einem bestimmten räumlichen Referenzsystem zuzuordnen sind, bedeutet, dass die im Labyrinth aufzeigbaren Strategien nur eine recht grobe Unterteilung darstellen. Offensichtlich kann man auch innerhalb einer Strategie noch verschiedene Referenzen nutzen. Aber auch andere Subprozesse wären denkbar. So kann man sich etwa vorstellen, dass jemand, der eine interne Strategie verwendet verbal vorgeht („erst gehe ich einmal nach links, dann zweimal nach rechts“) oder auch Richtungen und Vektoren verwendet oder eben automatisierte Motorantworten repräsentiert hat. Die beiden Strategien bilden das breite Spektrum möglicher Vorgehensweisen somit nur unzureichend ab.

Eine mögliche feinere Unterteilung wäre die, beide Referenzsysteme und beide verhaltensexperimentell aufzeigbaren Strategien miteinander zu kombinieren, gewissermaßen vier Quadranten aufzumachen (vgl. Abb. 37)

Man könnte dann eine external-egozentrische, eine external-allozentrische, eine internal-egozentrische und eine internal-allozentrische Navigationsstrategie unterscheiden. Ob dies eine inhaltlich sinnvolle Unterscheidung wäre, müsste überprüft werden. Erste Hinweise könnten sich aus Nachanalysen der vorhandenen Daten ergeben.

In der dritten Studie wurden im Prinzip alle Daten erhoben, um eine Unterscheidung in die genannten vier Strategien vorzunehmen. Die Analyse nach Navigationsstrategie im Virtuellen Labyrinth und Referenzsystem brachte keinen Unterschied zwischen den vier Gruppen bezüglich des Antwortverhaltens in den Fragebögen (ANOVA). Das deutet dann eher darauf hin, dass diese Unterteilung wenig sinnvoll erscheint. Dies wäre allerdings noch genauer zu prüfen.

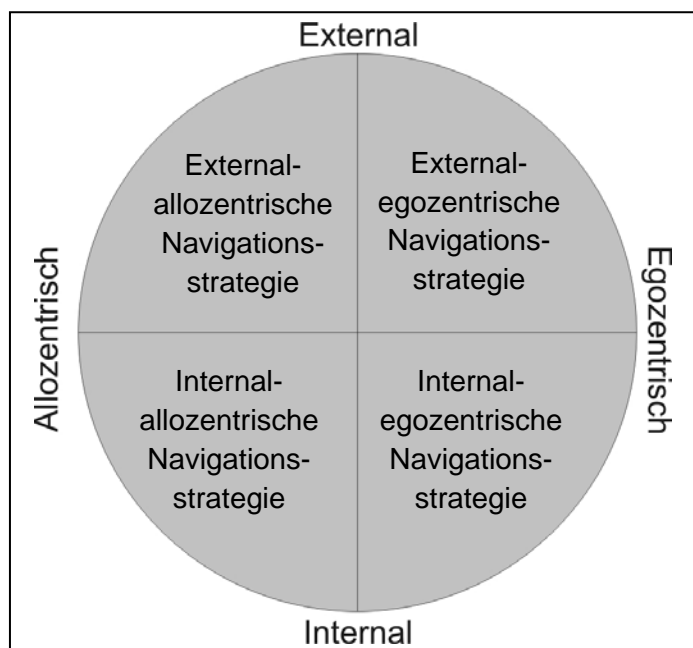


Abb. 37: Mögliche Feinstrukturierung räumlicher Navigationsstrategien. Auf der x-Achse sei das bevorzugte räumliche Referenzsystem aufgetragen, auf der y-Achse die im virtuellen Labyrinth präferierte Navigationsstrategie aufgetragen. Dadurch spannt sich ein zweidimensionaler Raum mit vier Quadranten auf, in dem möglicherweise jeder Pbn aufzutragen ist. Es ist zu überprüfen, ob sich diese vier Gruppen in Navigations-typischen Verhaltensmaßen unterscheiden.

In einem weiteren Versuch der Nachanalyse wurde geprüft, inwieweit in der zweiten Studie unter den Pbn mit internaler Strategie Personen mit und ohne Überblickswissen (operationalisiert durch die richtige Wiedergabe des Labyrinthgrundrisses) zu unterscheiden sind. Für die Gruppe der externalen Strategie ist dies nicht zweckmäßig, da in dieser Gruppe zu wenig Pbn sind. Es zeigt sich, dass diese Unterteilung ebenfalls keinerlei Unterschied zum Beispiel in den neuronalen Aktivierungsmustern erzeugt. Eine solche feinere Differenzierung ist also offenbar auch wenig sinnvoll, eventuell weil die richtige Wiedergabe des Grundrisses keine geeignete

Operationalisierung eines allozentrischen Referenzsystems darstellt. Tatsächlich haben Pbn mit einem allozentrischen Referenzsystem im Tunnel in der dritten Studie nicht häufiger den Grundriss richtig wiedergegeben als Pbn mit einem egozentrischen.

Eine weitere mögliche Differenzierung, die jedoch nicht vollständig mit den bereits vorhandenen Daten ausgeführt werden kann, wäre die, weit mehr Daten bezüglich räumlicher Navigationsstrategien zu erheben und dann etwa mittels Clusteranalyse Strategiecluster zu bilden. Es wäre dann zum Beispiel denkbar, neben den beiden Strategien im Virtuellen Labyrinth, den räumlichen Referenzsystemen und den Fragebogendaten noch die verschiedenen Arten des erworbenen Wissens abzufragen, das heißt neben der Wiedergabe des Grundrisses auch die Landmarken und Routenwissen abzufragen, sowie Zeigeaufgaben durchzuführen, das heißt etwa den Heimkehrvektor schätzen zu lassen. Somit könnte man eventuell den Navigationsstrategien noch näher rücken und die vorhandenen Unklarheiten in den bisherigen Arbeiten klären helfen. Nahe liegender wäre es aber zunächst, der Frage näher nachzugehen, ob die oben vorgeschlagene Unterteilung sinnvoll ist, was in weiteren Untersuchungen überprüft werden sollte (vgl. Abschnitt 5.4).

Dass die verhaltensexperimentell gefundenen Navigationsstrategien trotz ihrer möglicherweise recht groben Unterteilung dennoch erste Hinweise auf Strategieunterschiede geben und eine valide Differenzierung darstellen, dafür spricht, dass beide Strategien deutlich unterschiedliche neuronale Aktivierungen aufweisen. Es finden ganz offenbar tatsächlich unterschiedliche kognitive Prozesse während räumlicher Navigation bei den beiden Strategiegruppen statt.

5.2 Geschlechtsunterschiede

Die Untersuchung verschiedener Navigationsstrategien ging darauf zurück, dass einige Autoren davon ausgehen, dass Männer und Frauen deswegen unterschiedliche Leistungen in verschiedenen kognitiven Aufgaben erbringen, weil sie unterschiedliche Strategien verwenden. Es war ein Anliegen dieses Projekts, diesen Aspekt der Geschlechtsunterschiede näher zu betrachten. Es hat sich nun aber gezeigt, dass sich Männer und Frauen nicht deutlich in der Wahl einer der beiden hier operationalisierten Strategien unterscheiden, auch wenn die Ergebnisse der ersten Studie dies noch nahe legten. Deshalb werden die Überlegungen zu den Navigationsstrategien und den Geschlechtsunterschieden auch in zwei eigenen Unterkapiteln dieser Diskussion behandelt. Es ist aber trotz dieser scheinbaren Trennung so, dass es zumindest gewisse

Tendenzen zu Geschlechtsunterschieden in der Strategiepräferenz gibt. Dies wird an dieser Stelle ebenfalls diskutiert.

In dem Review von Coluccia und Louse (2004) wurde bereits dargestellt, dass die Geschlechtsunterschiede in räumlicher Navigation nicht so konsistent wie etwa bei Mentaler Rotation sind. In allen drei Studien zeigen sich dementsprechend unterschiedliche Bilder bezüglich der Leistungen im Virtuellen Labyrinth in Abhängigkeit vom Geschlecht. Insgesamt war das Labyrinth wohl zu leicht, um wirklich Leistungsunterschiede aufzeigen zu können. Aber von Coluccia und Louse (2004) wird es beschrieben: Wenn sich überhaupt Geschlechtsunterschiede finden lassen, dann erbringen immer Männer bessere Leistungen als Frauen. Um tatsächlich Aussagen über die Leistungsunterschiede der Geschlechter im Virtuellen Labyrinth treffen zu können, wäre es definitiv notwendig, ein schwierigeres Labyrinth zu verwenden.

Ziel der Untersuchungen war aber nicht primär die Untersuchung von Leistungsunterschieden, da diese schon oft genug aufgezeigt werden konnten (vgl. auch dazu Coluccia & Louse, 2004). Interessanter ist deshalb die Behauptung zu überprüfen, dass Männer und Frauen unterschiedliche Strategien räumlicher Navigation verwenden (z.B. Saucier et al., 2002; Lawton et al., 1996; vgl. auch Abschnitt 1.4.3).

Es zeigte sich nur in der ersten Studie eine gewisse Tendenz, dass Männer eher dazu neigen eine internale Strategie zu verwenden als Frauen. In den beiden anderen Studien zeigte sich das nicht. Ebenso fanden auch zum Beispiel Levy et al. (2005) keinen Unterschied bei verhaltensexperimentell erfassten Navigationsstrategien zwischen den Geschlechtern. Allerdings ist es konsistent mit den Ergebnissen vieler anderer Studien, dass sich Frauen und Männer in Selbsteinschätzungsfragebögen sehr deutlich in den angegebenen Strategien unterscheiden. So geben Frauen häufiger an als Männer, dass sie eher Landmarken- und Routenstrategien verwenden, während Männer eher angeben Orientierungsstrategien zu verwenden, beziehungsweise einen besseren Orientierungssinn zu haben.

Dies wirft die Frage auf, ob Männer und Frauen nur glauben, sie verwendeten unterschiedliche Strategien, dies aber gar nicht der Fall ist. Wie bereits in Abschnitt 4.4 erläutert, beeinflusst die Erwartung es handele sich um einen geschlechtssensitiven Test die Leistungen in diesem (z.B. Wraga et al., 2006). Das Geschlechtsstereotyp besagt, Frauen seien schlechter in räumlicher Orientierung und nutzten Landmarken mehr als Männer. Es wäre durchaus denkbar, dass Männer wie Frauen dem Stereotyp entsprechend in den Fragebögen antworten, während sie im Labyrinth weniger beeinflusst sind, da Sinn und Zweck der Untersuchung, nämlich Strategiedifferenzierung,

in diesem nicht ersichtlich ist. Deswegen geben Frauen möglicherweise seltener an, zum Beispiel einen guten Orientierungssinn zu haben als Männer, denn dies entspricht erstens ihren Erwartungen und zweitens ihrem Geschlechtsstereotyp, mit dem sie sich in der Regel identifizieren.

Die Erklärung, der Mann sei der Jäger in der Geschlechtsrollenverteilung der Frühzeit gewesen und habe deswegen ein weiteres Bewegungsumfeld gehabt und somit auch ein besseres räumliches Vorstellungsvermögen wie es vor allem in populärwissenschaftlichen Werken gerne behauptet wird²², greift offensichtlich zu kurz. Erwartungen und Stereotype, die eher kulturell als evolutionär zu erklären sind und auch einem gesellschaftlichen Wandel unterliegen, haben ganz offenbar auch Einfluss auf die Leistungen in bestimmten Aufgaben (vgl. z.B. auch Hausmann et al., in review). Antworten in Fragebögen sind noch anfälliger für Stereotype als die Leistungen. Somit kann man vermuten, dass Frauen und Männer auch ein wenig ihrem Geschlechtsstereotyp entsprechen wollen und entsprechend antworten. Da es also auf Verhaltensebene keine, beziehungsweise kaum Unterschiede zwischen Männern und Frauen in ihrer Strategiewahl gibt, in den durch Erwartungen und Stereotypen geprägten Selbsteinschätzungen aber schon, ist die Autorin geneigt zu glauben, dass die behaupteten Unterschiede zwischen Männern und Frauen bei der Verwendung bestimmter Navigationsstrategien auch weit weniger deutlich sind, als oft behauptet.

Nichtsdestotrotz gibt es eben doch auch biologische Unterschiede zwischen Männern und Frauen, die dann eben auch Unterschiede auf der Verhaltensebene produzieren. Diese Unterschiede sind nicht allzu stark und nicht allzu deutlich, aber es gibt sie. So modulieren etwa Sexualhormone bis zu einem bestimmten Grad die Strategiewahl im Virtuellen Labyrinth (vgl. Abschnitt 5.3) und so zeigen sich neuronale Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Man könnte somit meinen, Männer und Frauen denken anders, denn zumindest nutzen sie andere neuronale Prozesse.

Bisher wurden diese Geschlechtsunterschiede in den neuronalen Aktivierungen auf unterschiedlich verwendete Strategien zurückgeführt (z.B. Jordan et al., 2002; Grön et al., 2000), eben auf ein anderes „Denken“. Da sich Männer und Frauen aber in ihren verwendeten Navigationsstrategien, vor allem in der fMRI-Studie, nicht unterscheiden und trotzdem unterschiedliche Aktivierungen aufwiesen, deutet sich an, dass diese Interpretation eventuell zu kurz greift. Nehmen wir beispielsweise die Unterschiede in den visuellen Arealen. Frauen zeigten in visuellen Arealen stärkere neuronale

²² Vgl. z.B. „Warum Männer nicht zuhören und Frauen schlecht einparken“ von Pease & Pease aus dem Ullstein-Taschenbuch-Verlag (2000).

Aktivierungen als Männer. Man könnte jetzt interpretieren, sie verwendeten eben mehr visuelle Aufmerksamkeit auf das Labyrinth. Es zeigt sich aber, dass Männer und Frauen auch cytoarchitektonische und morphometrische Unterschiede vor allem in der Asymmetrie beider Hemisphären im visuellen Cortex aufweisen (Amunts et al., 2007). Das bedeutet, der visuelle Cortex ist anders aufgebaut. Es erstaunt unter diesen Umständen nicht besonders, dass unterschiedlich aufgebaute Cortices auch unterschiedlich arbeiten, das heißt unterschiedliche neuronale Aktivierungsmuster aufweisen. Das bedeutet aber ja nicht unbedingt, dass am Ende etwas anderes herauskommt. Es wäre somit durchaus denkbar, dass die neuronalen Aktivierungsmuster nicht auf die Verwendung unterschiedlicher kognitiver Strategien, das heißt hoch kognitive Prozesse zurückgehen, sondern auf viel frühere Prozesse der Verarbeitung, zum Beispiel bereits auf perzeptueller Ebene.

Es soll hier nicht behauptet werden, dass die bisherige Interpretation der unterschiedlichen kognitiven Prozesse unzutreffend sei. Auch im Rahmen dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 3.4) wurden die unterschiedlichen neuronalen Aktivierungen als Verbildlichung unterschiedlicher kognitiver Prozesse diskutiert. So wurde diskutiert, Männer stellten sich den abzulaufenden Weg möglicherweise stärker vor ihrem geistigen Auge vor als Frauen und bezögen dabei eher episodische Prozesse mit ein. Es wurde ferner die Möglichkeit diskutiert, Frauen nutzten eventuell eher egozentrische Informationen und hätten zum Beispiel mehr Schwierigkeiten mit der Koordination des visuellen Inputs und der Bewegungsausführung mittels Joystick. Allerdings sei an dieser Stelle erwähnt, dass Frauen im Tunnel in Studie 3 im Gegenteil seltener als Männer ein egozentrisches Vorgehen präferierten.

Dass es wohl auch Unterschiede auf höherer, das heißt kognitiver Ebene gibt, dafür spricht, dass es immerhin tendenzielle Unterschiede in der Strategiewahl gab, zumindest in der ersten Studie. Frauen präferierten eher eine externaler Strategie, was ja auch die Strategie ist, die durch weibliche Sexualhormone begünstigt zu sein scheint. Es gibt einige wenige Hinweise, dass sich dies auch auf neuronaler Ebene abbildet: So zeigten sich cerebellare neuronale Aktivierungen nur bei Frauen und bei Pbn mit externaler Strategie, während sich etwa sowohl bei Männern als auch bei Pbn mit internaler Strategie Aktivierungen im Präcuneus zeigten, die sich bei Frauen und Pbn mit externaler Strategie so eher nicht fanden. Das gleiche gilt für Aktivierungen in somatosensorischen Bereichen, die sich nur bei Männern und Pbn mit internaler Strategie fanden. Dies sind nur gewisse Hinweise und die Frage, ob nun wirklich eher höher kognitive Prozesse wie eine bestimmte Strategie die Ursache für neuronale

Aktivierungsunterschiede bei Männern und Frauen sind oder ob die Unterschiede auf viel niedrigeren Prozessebenen entstehen, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Diesbezüglich ist noch Forschungsbedarf offen (vgl. Abschnitt 5.4).

5.3 Sexualhormone und Navigation

Eine oft diskutierte Ursache für Geschlechtsunterschiede in kognitiven Aufgaben sind die unterschiedlich konzentrierten Mengen an Sexualhormonen innerhalb der Geschlechter. Diese Hormone haben nachweislichen Einfluss auf das ZNS, obwohl die genauen Wirkmechanismen bis heute weitestgehend unklar sind (vgl. Abschnitt 1.5.1.3).

Im Rahmen dieser Arbeit können im Grunde drei Aussagen bezüglich der Modulation durch Sexualhormone im Zusammenhang mit räumlicher Navigation gemacht werden: Sexualhormone modulieren zumindest teilweise 1. Leistungen in räumlichen Aufgaben, 2. die Strategiewahl im Virtuellen Labyrinth und 3. die neuronalen Aktivierungen während virtueller Navigation. Dies soll im Folgenden noch etwas genauer beschrieben werden.

Sexualhormone modulieren Leistungen in räumlichen Aufgaben. Für die Leistungen im Labyrinth fand sich in der ersten Studie nur in der Gruppe der Männer ein negativer Zusammenhang zwischen dem Testosteronspiegel und der Durchlaufzeit im Labyrinth, das heißt je mehr Testosteron, desto schneller durchliefen die Männer das Labyrinth. Bezüglich der Fehler fand sich in dieser Studie zwar kein, in der zweiten aber immerhin ein Zusammenhang mit Östrogen dahingehend, dass Pbn mehr Fehler machten, wenn ihr Östrogenspiegel hoch war. Im Mentalen Rotationstest (MRT) fand sich ein positiver Zusammenhang zwischen den Punkten im MRT und dem Testosteronwert: Je mehr Testosteron im Speichel, desto mehr Items wurden richtig bearbeitet, das heißt desto besser waren die Pbn im MRT.

Sexualhormone modulieren darüber hinaus auch die Strategiewahl im Virtuellen Labyrinth, wenngleich dies nicht immer gleichermaßen gefunden wurde. In der zweiten Studie, die aber deutlich weniger Pbn hatte, fand sich kein Zusammenhang zwischen Strategiewahl und Hormonstatus. Allerdings wählten in dieser Studie auch nur fünf Pbn überhaupt eine externale Navigationsstrategie. In der ersten Studie aber zeigte sich vor allem in der Gruppe der spontanzyklischen Frauen in ihrer (wahrscheinlichen) Lutealphase ein sehr beeindruckender Zusammenhang zwischen der Strategiewahl und dem Progesteron: Je mehr Progesteron im Speichel nachweisbar war, desto wahrscheinlicher wählte eine Probandin eine externale Strategie. In der Literatur wird ein

solcher Einfluss bisher nur im Tierexperiment nachgewiesen und dann auch nur für Östrogen und weibliche Tiere.

Zusätzlich zu diesen Modulationen auf Verhaltensebene zeigte sich, dass die Sexualhormone auch neuronale Aktivierungen zu modulieren scheinen, sowohl bei Männern als auch bei Frauen. Regressionsanalysen zeigten, dass sie dies auch in für die räumliche Navigation relevanten Arealen tun: So fand sich bei Frauen ein Zusammenhang mit dem Ausmaß der neuronalen Aktivierung in visuellen Arealen, welches ja nun gerade die Areale sind, in denen Frauen sowieso stärkere Aktivierungen als Männer während Navigation zeigten. Bei Männern zeigte sich demgegenüber ein Zusammenhang mit Testosteron und den neuronalen Aktivierungen im Hippocampus. Das gibt einen weiteren deutlichen Hinweis darauf, dass die Sexualhormone bei der Bearbeitung räumlicher Aufgaben, vor allem räumlicher Navigation, einen wichtigen Einflussfaktor darstellen und direkt in Arealen im Gehirn wirken, die für die Navigation eine wichtige Rolle spielen. Beide Bereiche sind obendrein Areale, für die bereits auch morphologische Geschlechtsunterschiede nachgewiesen wurden (vgl. Amunts et al., 2007; Cahill, 2006). Auch und gerade deshalb ist die Diskussion um kognitive Geschlechtsunterschiede ohne zumindest Beachtung der Sexualhormone als wichtige Einflussgrößen kaum mehr zu führen.

5.4 Schlussdiskussion und Ausblick

Zusammenfassend können die Ergebnisse dieser Arbeit wie folgt beschrieben werden: Navigationsstrategien sind verhaltensexperimentell differenzierbar. Die Wahl, welche Strategie dabei präferiert wird, hängt allenfalls bedingt vom Geschlecht ab. Frauen wählen etwas häufiger eine externale Navigationsstrategie als Männer. Ferner zeigte sich, dass die Wahl der Strategie durch Sexualhormone moduliert werden kann. Das könnte bedeuten, dass die Präferenz für eine bestimmte Strategie nicht unbedingt direkt durch das Geschlecht, sondern durch die unterschiedliche Konzentration der Sexualhormone moduliert wird. Als problematisch erweist sich, dass Navigationsstrategien insgesamt in der Literatur bisher nicht klar voneinander abgegrenzt werden und nicht einheitlich definiert und operationalisiert werden. Zudem erweisen sich einige Interpretationen der bisherigen Literatur im Rahmen dieser Arbeit als falsch. Die hier gefunden Navigationsstrategien scheinen zwar ebenfalls eine etwas zu grobe Unterteilung zu sein angesichts der komplexen Welt, in der wir uns bewegen. Sie können die zu vermutende Vielfalt unterschiedlichster kognitiver Prozesse während räumlicher Navigation natürlich nicht profund abbilden. Nichtsdestotrotz geben sie erste Hinweise auf individuelle

Unterschiede im Vorgehen und aufgrund der Fragebogen- und Aktivierungsdaten kann man sagen, dass ihre Unterteilung valide, wenn auch noch zu einfach ist.

Darum wäre ein Aspekt, der in Folgeuntersuchungen näher betrachtet werden sollte, der, ob eine weitere Unterteilung der Navigationsstrategien möglich und sinnvoll ist. Einige Möglichkeiten der weiteren verhaltensexperimentellen Unterteilung wurden in Abschnitt 5.1 bereits angesprochen. Meines Erachtens nach wäre es zunächst zweckmäßig die Unterteilung in die vier Strategiegruppen external-egozentrisch, external-allozentrisch, internal-egozentrisch und internal-allozentrisch vorzunehmen und zu überprüfen, ob diese sich in für Navigation relevanten Verhaltenskorrelaten wie Fehlern im Labyrinth unterscheiden. Dazu wäre es sinnvoll, die Schwierigkeit des Labyrinths zu erhöhen oder die Orientierungsfähigkeit in anderen Paradigmen zur räumlichen Navigation zu überprüfen. Ferner wäre das Abprüfen komplexerer Orientierungsleistungen wie das Zeigen des Heimkehrvektors wünschenswert. Sollten sich diese vier Gruppen dann signifikant voneinander abgrenzen lassen, dann hätte man eine weitere Unterteilungsmöglichkeit gefunden und empirisch untermauert. Dann wäre es eventuell auch möglich, die den Strategien zugrunde liegenden kognitiven Prozesse näher zu beschreiben. Es wäre in diesem Zusammenhang zu diskutieren, inwieweit das Tunnelparadigma ein valides Instrument zur Differenzierung räumlicher Referenzsysteme ist oder ob es noch andere Möglichkeiten gäbe, diese zu trennen.

Männer und Frauen unterscheiden sich kaum in ihren Navigationsleistungen, obwohl sie sich in anderen räumlichen Tests wie dem Mentalen Rotationstest deutlich unterscheiden. Sie unterscheiden sich nur bedingt in ihrer präferierten Navigationsstrategie, sehr wohl aber in ihrer eigenen Einschätzung dazu. Männer und Frauen aktivieren während räumlicher Navigation unterschiedliche neuronale Netzwerke. Dies könnte sowohl auf biologisch-physiologische Aspekte wie morphometrische Unterschiede im Gehirn oder die Wirkung von Sexualhormonen im ZNS zurückzuführen sein, wie auch auf unterschiedliche kognitive Prozesse, die sie nutzen.

Es wurde bereits oben beschrieben, dass Männer und Frauen sich sowohl in ihren neuronalen Aktivierungen in visuellen Arealen als auch in der Morphometrie dieser Areale unterscheiden. Dass die Sexualhormone damit etwas zu tun haben könnten, darauf deutet hin, dass etwa Östrogen und Progesteron die Aktivierung in ihnen modulieren. Somit wäre es eventuell sinnvoll, dies noch genauer zu untersuchen, auch um die Frage zu klären, ob höhere kognitive Prozesse oder weitaus rudimentärere

Prozesse etwa auf Wahrnehmungsebene für Unterschiede in der neuronalen Aktivierung verantwortlich sind.

Eine Idee wäre es, spontanzyklische Frauen an drei unterschiedlichen Zeitpunkten ihres Zyklus zu untersuchen. Sie sollten dann „visuelle“ Aufgaben wie etwa Aufgaben zur Tiefenwahrnehmung bearbeiten, um untersuchen zu können, ob zum Beispiel die Fähigkeit zur Tiefenwahrnehmung über den Zyklus variiert. Sollte dies der Fall sein, könnte man davon ausgehen, dass die Sexualhormone bereits auf frühen Stufen der Wahrnehmung Einfluss nehmen und man könnte ferner vermuten, dass etwa Schwankungen in räumlichen Leistungen über den Zyklus ebenfalls auf sehr frühen Wahrnehmungsebenen begründet sind.

6. Zusammenfassung

Schlüsselwörter: Raumkognition – Orientierung – Navigation – Virtuelle Realität – Strategien – Geschlechtsunterschiede – Sexualhormone – funktionelle Magnetresonanztomographie

In der Literatur werden immer wieder Geschlechtsunterschiede in räumlichen Navigations- und Orientierungsaufgaben diskutiert. Dabei wird oft angenommen, dass die gefundenen Leistungsunterschiede auf die Anwendung unterschiedlicher Strategien beim Lösen der Aufgaben zurück zu führen sind. Neben evolutionären und psychosozialen Faktoren werden auch biologische Faktoren wie etwa Sexualhormone als mögliche Modulatoren sowohl der Leistungen als auch der Strategien diskutiert. Als besonders problematisch ist in diesem Zusammenhang anzusehen, dass Navigationsstrategien in verschiedenen Arbeiten höchst unterschiedlich beschrieben und konzeptualisiert werden. Strategien werden oftmals nicht näher theoretisch und empirisch spezifiziert und fundiert. In der Regel werden sie nur anhand von Selbstbeschreibungen und –beurteilungen der Probandinnen und Probanden erhoben.

Um Geschlechtsunterschiede und den Einfluss von Sexualhormonen bei der Präferenz für bestimmte Navigationsstrategien näher zu untersuchen, ist es daher zunächst unverzichtbar, bisherige Konzepte zu räumlichen Navigationsstrategien kritisch zu analysieren und zu bewerten. Dabei muss über eine Operationalisierung, die nur auf Fragebögen und Selbstbeschreibungen gründet, hinaus gegangen werden. Zusätzliche Untersuchungen neuronaler Aktivierungsmuster während der Navigation in Abhängigkeit von der Navigationsstrategie versprechen zudem nähere Einblicke in zugrunde liegende kognitive Prozesse.

Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb eine verhaltensexperimentelle Trennung verschiedener Navigationsstrategien und deren nähere empirische Untersuchung über Verhaltens-, fMRI- und zusätzlich Fragebogendaten. Dies ist die Voraussetzung für eine tiefer gehende Betrachtung von Geschlechtsunterschieden in der Strategiepräferenz, sowie möglicher Einflussfaktoren wie Sexualhormonen. Es wurden dazu in einem virtuellen Labyrinth zwei Navigationsstrategien erfasst, die hier externe und interne Strategie genannt wurden und auch schon von anderen Autoren, allerdings unter unterschiedlichen Namen, beschrieben wurden. Diese werden oft vereinfachend als - auf räumliche Referenzsysteme Bezug nehmend - allozentrische und egozentrische oder einfach als räumliche und nicht-räumliche Strategie begriffen.

Es zeigte sich aber in den ersten Untersuchungen dieser Arbeit, dass die vermeintlich egozentrische und nicht-räumliche interne Strategie eher Kriterien einer allozentrischen

und räumlichen Strategie erfüllt. Umgekehrtes gilt für die vermeintlich allozentrische und räumliche externalen Strategie. Eine näher gehende Prüfung zeigte jedoch, dass die beiden Strategien in keinem Zusammenhang zu bevorzugten räumlichen Referenzsystemen wie dem egozentrischen oder allozentrischen stehen und somit eine Zuordnung zu diesen unzulässig ist. Auch die vorschnelle Gleichsetzung der externalen mit einer räumlichen, sowie der internalen mit einer nicht-räumlichen Strategie muss aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit definitiv abgelehnt werden. Es wird aus diesen vielmehr geschlussfolgert, dass umgekehrt die interne Strategie eher einer räumlichen Strategie entspricht und die externalen eher einer nicht-räumlichen. Demnach sind bisherige Strategieklassifikationen insgesamt unzureichend, oft auch viel zu vereinfachend und zum Teil sogar falsch. Eine Interpretation von Geschlechtsunterschieden bei der Strategiewahl wird dadurch schwieriger. Diese Tatsache wird noch dadurch verstärkt, dass sich verhaltensexperimentell kaum Unterschiede in der Strategiepräferenz aufzeigen ließen. Auf der Ebene neuronaler Aktivierungsunterschiede bei Männern und Frauen fanden sich aber Unterschiede. Dies lässt vermuten, dass während räumlicher Navigation unterschiedliche kognitive Prozesse bei Männern und Frauen ablaufen. Hinzu kommt, dass weibliche Sexualhormone zumindest bedingt die Wahl einer externalen Strategie begünstigen und die neuronalen Aktivierungen in für Navigation relevanten Arealen modulieren.

Insgesamt ist aus den Ergebnissen dieser Arbeit zu schlussfolgern, dass Geschlechtsunterschiede in der Strategiewahl bisher mit nur unzureichenden Konzepten untersucht wurden. Auf der Verhaltensebene können zudem kaum Geschlechtsunterschiede gefunden werden. Demgegenüber sind auf neuronaler Ebene Aktivierungsunterschiede zwischen Männern und Frauen zu erkennen. Darüber hinaus schätzten sich die Geschlechter in Strategiefragebögen unterschiedlich ein. Das spricht dafür, dass es Unterschiede bei der kognitiven Verarbeitung gibt und dass diese mit den zwei verhaltensexperimentell differenzierbaren Navigationsstrategien nur unzureichend abgebildet werden können. Obwohl die beiden Navigationsstrategien aufgrund der gefundenen Verhaltens- und fMRI-Daten als valide unterscheidbare Konstrukte angesehen werden können, bilden sie die Komplexität der unterschiedlichen zugrunde liegenden Prozesse nicht ausreichend ab. Es ist deswegen wünschenswert, dass in Zukunft nicht vorschnell vereinfachende Strategiemodelle übernommen werden, wenn so differenzierte Fragestellungen wie zum Beispiel Geschlechtsunterschiede in der Strategiepräferenz weitgehend beantwortet werden sollen.

Literaturverzeichnis

- Aguirre, G. K., Detre, J. A., Alsop, D. C., & D'Esposito, M. (1996). The parahippocampus subserves topographical learning in man. *Cereb.Cortex*, *6*, 823-829.
- Aguirre, G. K., Zarahn, E., & D'Esposito, M. (1998). Neural components of topographical representation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*, 839-846.
- Aleman, A., Bronk, E., Kessels, R. P. C., Koppeschaar, H. P. F., & van Honk, J. (2004). A single administration of testosterone improves visuospatial ability in young women. *Psychoneuroendocrinology*, *29*, 612-617.
- Allen, G. L. (1999). Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding. In R.G.Golledge (Ed.), *Wayfinding behavior*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.
- Aloisi, A. M. (2007). Geschlecht und Hormone. In S. Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht* (pp. 3-18). Heidelberg: Springer.
- Alvis, G. R., Ward, J. P., Dodson, D. L., & Pusakulich, R. L. (1990). Inverse patterns in successful finger-maze acquisition performance by right-handed males and left-handed females. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *28* (5), 421-423.
- Amunts, K. & Zilles, K. (2007). Multimodaler Atlas des menschlichen Gehirns: Ein Weg zur integrierten Struktur-Funktionsanalyse. *NeuroForum*, *4*, 112-121.
- Amunts, K., Armstrong, E., Malikovic, A., Hömke, L., Mohlberg, H., Schleicher, A. & Zilles, K. (2007). Gender-specific left-right asymmetries in human visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *27*, 1356-1364.
- Amunts, K., Kedo, O., Kindler, M., Pieperhoff, P., Mohlberg, H., Shah, N. J. et al. (2005). Cytoarchitectonic mapping of the human amygdala, hippocampal region and entorhinal cortex: intersubject variability and probability maps. *Anatomy & Embryology*, *210*, 343-352.
- Amunts, K., Malikovic, A., Mohlberg, H., Schormann, T., & Zilles, K. (2000). Brodmann's areas 17 and 18 brought into stereotaxic space—where and how variable? *NeuroImage*, *11*, 66-84.
- Annett, M. (1970). A classification of hand preference by association analysis. *British Journal of Psychology*, *61*, 303-321.
- Annett, M. (1995). The right shift theory of a genetic balanced polymorphism for cerebral dominance and cognitive processing. *Current Psychology of Cognition*, *14*, 427-480.
- Arnold, A. P. (2007). Biologische Grundlagen von Geschlechtsunterschieden. In S.Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Eds.), *Geschlecht und Gehirn* (pp. 19-39). Heidelberg: Springer.
- Astur, R. S., Ortiz, M. L., & Sutherland, R. J. (1998). A characterization of performance by men and women in a virtual Morris water task: A large and reliable sex difference. *Behavioural Brain Research*, *93*, 185-190.
- Astur, R. S., Tropp, J., Sava, S., Constable, R. T., & Markus, E. J. (2004). Sex differences and correlations in a virtual Morris water task, a virtual radial arm maze, and mental rotation. *Behavioral Brain Research*, *151*, 103-115.
- Barkowsky, T., Knauff, M., Ligozat, G., & Montello, D. R. (2007). *Spatial Cognition V: Reasoning, Action, Interaction*. Heidelberg: Springer.
- Battaglia-Mayer, A., Archambault, P. S., & Caminiti, R. (2006). The cortical network for eye-hand coordination and its relevance to understanding motor disorders of parietal patients. *Neuropsychologia*, *44*, 2607-2620.
- Baulieu, E. E., Schumacher, M., Koenig, H., Jung-Testas, I., & Akwa, Y. (1996). Progesterone as a neurosteroid: actions within the nervous system. *Cellular and molecular neurobiology*, *16*, 143-154.
- Berthoz, A. (1997). Parietal and hippocampal contribution to topokinetic and topographic memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, *352*, 1437-1448.

Literaturverzeichnis

- Bever, T. G. (1992). The logical and extrinsic sources of modularity. In M. Gunnar & M. Maratsos (Eds.), *Modularity and constraints in language and cognition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S., Rao, S. M., & Cox, R. W. (1999). Conceptual processing during the conscious resting state. A functional MRI study. *Journal of cognitive neuroscience*, *11*, 80-95.
- Bird, C. M. & Burgess, N. (2008). The hippocampus and memory: insights from spatial processing. *Nature Reviews: Neuroscience*, *9*, 182-194.
- Blades, M. (1991). Wayfinding theory and research: The need for a new approach. In D.M. Mark & A. U. Frank (Eds.), *Cognitive and linguistic aspects of geographic space*. Dordrecht: Kluwer.
- Blajenkova, O., Motes, M. A., & Kozhevnikov, M. (2005). Individual differences in the representations of novel environments. *Journal of Environmental Psychology*, *25*, 97-109.
- Blakemore, S. J. & Frith, C. (2003). Self-awareness and action. *Current Opinion in Neurobiology*, *13*, 219-224.
- Blickle, G. (1996). Personality traits, learning strategies, and performance. *European Journal of Personality*, *10*, 337-352.
- Block, J. (1995). A contrarian view of the Five-Factor approach to personality description. *Psychological Bulletin*, *117*, 187-215.
- Bohbot, V. D., Kalina, M., Stepankova, K., Spackova, N., Petrides, M., & Nadel, L. Y. N. N. (1998). Spatial memory deficits in patients with lesions to the right hippocampus and to the right parahippocampal cortex. *Neuropsychologia*, *36*, 1217-1238.
- Bonifazi, M., Ginanneschi, F., della Volpe, R., & Rossi, A. (2004). Effects of gonadal steroids on the input-output relationship of the corticospinal pathway in humans. *Brain Research*, *1011*, 187-194.
- Borkenau, P. & Ostendorf, F. (1993). *NEO-Fünf-Faktoren Inventar (NEO-FFI) nach Costa und McCrae*. Handanweisung. Göttingen: Hogrefe.
- Brandhorst, G., Behrens, K., Hinrichs, S., Jordan, K., Oellerich, M., & von Ahsen, N. (2008). Performance characteristics of serum and salivary hormone quantification for luteal phase confirmation in behavioural studies. *Endocrine Abstracts*, *16*, P405.
- Bremmer, F., Duhamel, J.-R., Ben Hamed, S., & Graf, W. (1997). The representation of movement in near extra-personal space in the macaque ventral intraparietal area (VIP). In P. Thier & H.-O. Karnath (Eds.), *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D space*. Heidelberg: Springer.
- Brodman, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde*. Leipzig: Barth.
- Burgess, N. (2006). Spatial memory: How egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 551-557.
- Burgess, N., Jeffery, K. J., & O'Keefe, J. (1999a). Integrating hippocampal and parietal functions: a spatial point of view. In N. Burgess, K. J. Jeffery, & J. O'Keefe (Eds.), *The Hippocampal and Parietal Foundations of Spatial Cognition*. New York: Oxford University Press.
- Burgess, N., Jeffery, K. J., & O'Keefe, J. (1999b). *The Hippocampal and Parietal Foundations of Spatial Cognition*. New York: Oxford University Press.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, E. J. (2002). The Human Hippocampus and Spatial and Episodic Memory. *Neuron*, *35*, 625-641.
- Burgess, N., Maguire, E. A., Spiers, H. J., & O'Keefe, J. (2001). A temporoparietal and prefrontal network for retrieving the spatial context of lifelike events. *Neuroimage*, *14*, 439-453.

Literaturverzeichnis

- Burkitt, J., Widman, D., & Saucier, D. M. (2007). Evidence for the influence of testosterone in the performance of spatial navigation in a virtual water maze in women but not in men. *Hormones and Behavior, 51*, 649-654.
- Byrne, P., Becker, S., & Burgess, N. (2007). Remembering the past and imagining the future: A neural model of spatial memory and imagery. *Psychological Review, 114*, 340-375.
- Cabeza, R., Mangels, J., Nyberg, L., Habib, R., Houle, S., McIntosh, A. R. et al. (1997). Brain Regions Differentially Involved in Remembering What and When: a PET Study. *Neuron, 19*, 863-870.
- Cahill, L. (2006). Why sex matters for neuroscience. *Nature Reviews: Neuroscience, 7*, 477-484.
- Cavanna, A. E. & Trimble, M. R. (2006). The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain, 129*, 564-583.
- Chabanne, V., Péruch, P., & Thinus-Blanc, C. (2005). Sex differences and women's hormonal cycle effects on spatial performance in a virtual environment navigation task. *Current Psychology of Cognition, 22*, 351-375.
- Choi, H. J., Zilles, K., Mohlberg, H., Schleicher, A., Fink, G. R., Armstrong, E. & Amunts, K. (2006). Cytoarchitectonic identification and probabilistic mapping of two distinct areas within the anterior ventral bank of the human intraparietal sulcus. *Journal of Comparative Neurology, 495*, 53-69.
- Choi, J. & Silverman, I. (1996). Sex dimorphism in spatial behaviors: applications to route learning. *Evolution & Cognition, 2*, 165-171.
- Choi, J. & Silverman, I. (2002). The relationship between testosterone and route-learning strategies in humans. *Brain and Cognition, 50*, 116-120.
- Cohn, N. B., Kircher, J., Emmerson, R. Y., & Dustman, R. E. (1985). Pattern reversal evoked potentials: age, sex and hemispheric asymmetry. *Electroencephalography and clinical neurophysiology, 62*, 399-405.
- Colby, C. L. & Goldberg, M. E. (1999). Space and Attention in Parietal Cortex. *Annual Review of Neuroscience, 22*, 319-350.
- Coluccia, E. & Louse, G. (2004). Gender differences in spatial orientation: A review. *Journal of Environmental Psychology, 24*, 329-340.
- Corkin, S. (2002). What's new with the amnesic patient H.M.? *Nature Reviews: Neuroscience, 3*, 153-160.
- Costa, P. T. & McCrae, R. R. (1992). Normal personality assessment in clinical practice: The NEO Personality Inventory. *Psychological Assessment: A journal of Consulting and Clinical Psychology, 4*, 5-13.
- Couclelis, H. (1996). Verbal directions for wayfinding: Space, cognition, and language. In J. Portugali (Ed.), *The construction of cognitive maps*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Czihak, G., Langer, H., & Ziegler, H. H. (1996). *Biologie* (6. Auflage). Berlin: Springer.
- Dabbs, J. M., Chang, E.-L., Strong, R. A., & Milun, R. (1998). Spatial Ability, Navigation Strategy, and Geographic Knowledge Among Men and Women. *Evolution and Human Behavior, 19*, 89-98.
- Daniel, J. M. & Dohanich, G. P. (2001). Acetylcholine Mediates the Estrogen-Induced Increase in NMDA Receptor Binding in CA1 of the Hippocampus and the Associated Improvement in Working Memory. *Journal of Neuroscience, 21*, 6949-6956.
- deIpolyi, A. R., Fang, S., Palop, J. J., Yu, G. Q., Wang, X., & Mucke, L. (2008). Altered navigational strategy use and visuospatial deficits in hAPP transgenic mice. *Neurobiology of Aging, 29*, 253-266.

Literaturverzeichnis

- Denis, M., Pazzaglia, F., Cornoldi, C., & Bertolo, L. (1999). Spatial discourse and navigation: an analysis of route directions in the city of Venice. *Applied Cognitive Psychology, 13*, 145-174.
- Devan, B. D., Goad, E. H., & Petri, H. L. (1996). Dissociation of Hippocampal and Striatal Contributions to Spatial Navigation in the Water Maze. *Neurobiology of Learning and Memory, 66*, 305-323.
- Dietrich, T., Krings, T., Neulen, J., Willmes, K., Erberich, S., Thron, A. et al. (2001). Effects of Blood Estrogen Level on Cortical Activation Patterns during Cognitive Activation as Measured by Functional MRI. *Neuroimage, 13*, 425-432.
- Digman, J. M. (1990). Personality structure: Emergence of the five-factor model. *Annual Review of Psychology, 41*, 417-440.
- Dluzen, D. & Horstink, M. (2003). Estrogen as neuroprotectant of nigrostriatal dopaminergic system: laboratory and clinical studies. *Endocrine, 21*, 67-75.
- Driscoll, I., Hamilton, D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: the impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior, 47*, 326-335.
- Eichenbaum, H., Dudchenko, P., Wood, E., Shapiro, M., & Tanila, H. (1999). The Hippocampus, Memory, and Place Cells: Is It Spatial Memory or a Memory Space? *Neuron, 23*, 209-226.
- Eickhoff, S. B., Amunts, K., Mohlberg, H., & Zilles, K. (2006). The human parietal operculum. II. Stereotaxic maps and correlation with functional imaging results. *Cerebral Cortex, 16*, 268-279.
- Eickhoff, S. B., Paus, T., Caspers, S., Grosbras, M. H., Evans, A. C., Zilles, K. & Amunts, K. (2007). Assignment of functional activations to probabilistic cytoarchitectonic areas revisited. *NeuroImage, 36*, 511-521.
- Eickhoff, S. B., Schleicher, A., Zilles, K., & Amunts, K. (2006). The human parietal operculum: I. Cytoarchitectonic mapping of subdivisions. *Cerebral Cortex, 16*, 254-267.
- Eickhoff, S. B., Stephan, K. E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G. R., Amunts, K. & Zilles, K. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage, 25*, 1325-1335.
- Etchamendy, N. & Bohbot, V. D. (2007). Spontaneous navigational strategies and performance in the virtual town. *Hippocampus, 17*, 595-599.
- Eysenck, H. J. (1967). *The biological basis of personality*. Springfield: Charles C. Thomas.
- Ferstl, R. (1972). Learning-strategies and personality: A pilot study. *Studia Psychologica, 14*, 309-312.
- Fitting, S. (2002). *Orientierungsstrategien in virtuellen Umgebungen - Interindividuelle Unterschiede und Interventionseffekte*. Unveröffentlichte Diplomarbeit.
- Fitting, S., Glück, J., & Brehm, M. (2001). Spatial Strategies – Orientierungsstrategien in virtuellen Umgebungen. Poster präsentiert auf dem Kongress der Differentiellen Psychologie und Diagnostik, Leipzig.
- Friston, K. J., Ashburner, J. T., Kiebel, S. J., Nichols, T. E., & Penny, W. D. (2007). *Statistical Parametric Mapping. The Analysis of Functional Brain Images*. (1st ed.) London: Academic Press.
- Frye, C. A., Duffy, C. K., & Walf, A. A. (2007). Estrogens and progestins enhance spatial learning of intact and ovariectomized rats in the object placement task. *Neurobiology of Learning and Memory, 88*, 208-216.
- Galea, L. A. & Kimura, T. (1993). Sex differences in route- learning. *Personality & Individual Differences, 14*, 53-65.

Literaturverzeichnis

- Galea, L. A. M., Kavaliers, M., Ossenkopp, K.-P., & Hampson, E. (1995). Gonadal Hormone Levels and Spatial Learning Performance in the Morris Water Maze in Male and Female Meadow Voles, *Microtus pennsylvanicus*. *Hormones and Behavior*, *29*, 106-125.
- Geyer, S. (2003). *The Microstructural Border Between the Motor and the Cognitive Domain in the Human Cerebral Cortex*. Wien: Springer.
- Geyer, S., Ledberg, A., Schleicher, A., Kinomura, S., Schormann, T., Bürgel, U., Klingberg, T., Larsson, J., Zilles, K., & Roland, P.E. (1996). Two different areas within the primary motor cortex of man. *Nature*, *382*, 805-807.
- Geyer, S., Schleicher, A., & Zilles, K. (1999). Areas 3a, 3b, and 1 of human primary somatosensory cortex: 1. Microstructural organization and interindividual variability. *NeuroImage*, *10*, 63-83.
- Geyer, S., Schormann, T., Mohlberg, H., & Zilles, K. (2000). Areas 3a, 3b, and 1 of human primary somatosensory cortex. Part 2. Spatial normalization to standard anatomical space. *NeuroImage*, *11*, 684-696.
- Ghaem, O., Mellet, E., Crivello, F., Tzourio, N., Mazoyer, B., Berthoz, A. et al. (1997). Mental navigation along memorized routes activates the hippocampus, precuneus, and insula. *Neuroreport*, *8*, 739-744.
- Gillner, S. & Mallot, H. A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 445-463.
- Godwin, J., Hartmann, V., Nag, P., & Crews, D. (2000). Androgenic regulation of steroid hormone receptor mRNA in the brain of whiptail lizards. *Journal of Neuroendocrinology*, *12*, 599-606.
- Gold, M., Adair, J. C., Jacobs, D. H., & Heilman, K. M. (1995). Right-left confusion in Gerstmann's syndrome: a model of body centered spatial orientation. *Cortex*, *31*, 267-283.
- Golledge, R. G. (1999). *Wayfinding Behavior*. Baltimore: The John Hopkins University Press.
- Graham, J. D. & Clarke, C. L. (1997). Physiological Action of Progesterone in Target Tissues. *Endocrine Reviews*, *18*, 502-519.
- Gramann, K., Müller, H. J., Eick, E. M., & Schönebeck, B. (2005). Evidence of separable spatial representations in a virtual navigation task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 1199-1223.
- Gramann, K., Müller, H. J., Schönebeck, B., & Debus, G. (2006). The neural basis of ego- and allocentric reference frames in spatial navigation: Evidence from spatio-temporal coupled current density reconstruction. *Brain Research*, *1118*, 116-129.
- Grefkes, C., Geyer, S., Schormann, T., Roland, P. E., & Zilles, K. (2001). Human somatosensory area 2: observer-independent cytoarchitectonic mapping, interindividual variability, and population map. *NeuroImage*, *14*, 617-631.
- Grön, G., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., Tomczak, R., & Riepe, M. W. (2000). Brain activation during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, *3*, 404-408.
- Habib, M. & Sirigu, A. (1987). Pure topographical disorientation: a definition and anatomical basis. *Cortex*, *23*, 73-85.
- Häfner, H. (2007). Die Rolle von Geschlecht und Gehirn bei Schizophrenie. In S. Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht*. Berlin: Springer.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M. B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, *436*, 801-806.
- Halpern, D. F. & Tan, U. (2001). Stereotypes and steroids: using a psychobiosocial model to understand cognitive sex differences. *Brain Cognition*, *45*, 392-414.

Literaturverzeichnis

- Halsband, U. & Lange, R. K. (2006). Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology*, *99*, 414-424.
- Hammond, J., Le, Q., Goodyer, C., Gelfand, M., Trifiro, M., & LeBlanc, A. (2001). Testosterone-mediated neuroprotection through the androgen receptor in human primary neurons. *Journal of Neurochemistry*, *77*, 1319-1326.
- Hanakawa, T., Immisch, I., Toma, K., Dimyan, M. A., Van Gelderen, P., & Hallett, M. (2003). Functional Properties of Brain Areas Associated With Motor Execution and Imagery. *Journal of Neurophysiology*, *89*, 989-1002.
- Harrel, W. A., Bowlby, J. W., & Hall-Hoffarth, D. (2000). Directing Wayfinders with Maps: The Effects of Gender, Age, Route Complexity, and Familiarity With the Environment. *Journal of Social Psychology*, *140*, 169-178.
- Hartley, T. & Burgess, N. (2005). Complementary memory systems: competition, cooperation and compensation. *Trends in Neurosciences*, *28*, 169-170.
- Hartley, T., King, J. A., & Burgess, N. (2003a). Studies of the neural basis of human navigation and memory. In K.J. Jeffery (Ed.), *The Neurobiology of Spatial Behaviour*. Oxford: Oxford University Press.
- Hartley, T., Maguire, E. A., Spiers, H. J., & Burgess, N. (2003b). The Well-Worn Route and the Path Less Traveled: Distinct Neural Bases of Route Following and Wayfinding in Humans. *Neuron*, *37*, 877-888.
- Hasselback, M. & Butter, C. M. (1997). Ipsilesional displacement of egocentric midline in neglect patients with, but not in those without, extensive parietal damage. In H.-O. Karnath & P. Tier (Eds.), *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D Space*. Heidelberg: Springer.
- Hausmann, M. & Güntürkün, O. (2000). Steroid fluctuations modify functional cerebral asymmetries: the hypothesis of progesterone-mediated interhemispheric decoupling. *Neuropsychologia*, *38*, 1362-1374.
- Hausmann, M. (2007). Kognitive Geschlechtsunterschiede. In: S. Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Hrsg.), *Gehirn und Geschlecht*. Heidelberg: Springer.
- Hausmann, M., Schoofs, D., Rosenthal, H. E. S., & Jordan, K. (in review). Interactive effects of sex hormones and gender stereotypes on cognitive sex differences - a psychobiosocial approach.
- Hausmann, M., Slabberkorn, D., Van Goozen, S., Cohen-Kettenis, P. T., & Güntürkün, O. (2000). Sex hormones affect spatial abilities during the menstrual cycle. *Behavioral Neuroscience*, *114*, 1245-1250.
- Herrmann, T., Schweizer, K., Janzen, G., & Katz, S. (1998). Routen- und Überblickswissen - konzeptuelle Überlegungen. *Kognitionswissenschaft*, *7*, 145-159.
- Hillis, A. E., Newhart, M., Heidler, J., Barker, P. B., Herskovits, E. H., & Degaonkar, M. (2005). Anatomy of spatial attention: insights from perfusion imaging and hemispatial neglect in acute stroke. *Journal of Neuroscience*, *25*, 3161-3167.
- Holding, C. S. & Holding, D. H. (1989). Acquisition of route network knowledge by males and females. *Journal of General Psychology*, *116*, 29-41.
- Hölscher, C., Büchner, S. J., Meilinger, T., & Strube, G. (2007). Map Use and Wayfinding Strategies in a Multi-building Ensemble. In: T. Barkowsky, M. Knauff, G. Ligozat, & D. R. Montello (Eds.), *Spatial Cognition V*. Berlin: Springer.
- Hooven, C. K., Chabris, C. F., Ellison, P. T., & Kosslyn, S. M. (2004). The relationship of male testosterone to components of mental rotation. *Neuropsychologia*, *42*, 782-790.
- Hugdahl, K., Thomsen, T., & Erslund, L. (2006). Sex differences in visuo-spatial processing: An fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia*, *44*, 1575-1583.

Literaturverzeichnis

- Hund, A. M. & Minarik, J. L. (2006). Getting from here to there: Spatial Anxiety, Wayfinding Strategies, Direction Type, and Wayfinding Efficiency. *Spatial Cognition and Computation*, 6, 179-201.
- Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive Strategies Dependent on the Hippocampus and Caudate Nucleus in Human Navigation: Variability and Change with Practice. *Journal of Neuroscience*, 23, 5945-5952.
- Ino, T., Inoue, Y., Kage, M., Hirose, S., Kimura, T., & Fukuyama, H. (2002). Mental navigation in humans is processed in the anterior bank of the parieto-occipital sulcus. *Neurosci.Lett.*, 322, 182-186.
- Ishikawa, T. & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive Psychology*, 52, 93-129.
- Joe, I., Kipp, J. L., & Ramirez, V. D. (2005). The non-genomic Action of Sex Steroids. In C.Kordon, R.-C. Gaillard, & Y. Christen (Eds.), *Hormones and the Brain*. Berlin: Springer.
- Johansson, I. M., Birzniece, V., Lindblad, C., Olsson, T., & Backstrom, T. (2002). Allopregnanolone inhibits learning in the Morris water maze. *Brain Research*, 934, 125-131.
- Johnsrude, I., Owen, A., Crane, J., Milner, B., & Evans, A. (1999). A cognitive activation study of memory for spatial relationships. *Neuropsychologia*, 37, 829-841.
- Jordan, K., Schadow, J., Wüstenberg, T., Heinze, H. J., & Jäncke, L. (2004). Different cortical activations for subjects using allocentric or egocentric strategies in a virtual navigation task. *Neuroreport*, 15, 135-140.
- Jordan, K., Wüstenberg, T., Heinze, H. J., Peters, M., & Jäncke, L. (2002). Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, 40, 2397-2408.
- Karnath, H.-O. (2006). Die Pusher-Symptomatik. In H.-O.Karnath & P. Thier (Eds.), *Neuropsychologie*. Heidelberg: Springer.
- Katz, D. B. & Steinmetz, J. E. (2002). Psychological Functions of the Cerebellum. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 1, 229-241.
- Kaufmann, C., Elbel, G.-K., Gössl, C., Pütz, B., & Auer, D. P. (2001). Frequency dependence and gender effects in visual cortical regions involved in temporal frequency pattern processing. *Human Brain Mapping*, 14, 38.
- Kawata, M. (1995). Roles of steroid hormones and their receptors in structural organization in the nervous system. *Neuroscience Research*, 24, 1-46.
- Kealy, J., Diviney, M., Kehoe, E., McGonagle, V., O'Shea, A., Harvey, D. & Commins, S. (2008). The effects of overtraining in the Morris water maze on allocentric and egocentric learning strategies in rats. *Behavioural Brain Research*, 192 (2), 259-63.
- Kerkhoff, G. (2006). Störungen der visuellen Raumorientierung. In H.-O.Karnath & P. Thier (Eds.), *Neuropsychologie*. Berlin: Springer.
- Kermadi, I., Liu, Y., Tempini, A., & Rouiller, E. M. (1997). Effects of reversible inactivation of the supplementary motor area (SMA) on unimanual grasp and bimanual pull and grasp performance in monkeys. *Somatosensory & motor research*, 14, 268-280.
- Kim, Y. Y., Kim, H. J., Eun, N. K., Hee, D. K., & Hyun, T. K. (2005). Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, 42, 616-625.
- Kimura, D. (1999). *Sex and Cognition*. (1st ed.) Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press.

Literaturverzeichnis

- Kimura, D. (2002). Sex Hormones Influence Human Cognitive Pattern. *Neuro Endocrinology Letters*, 23, 67-77.
- Kimura, D. (2004). Human sex differences in cognition: fact, not predicament. *Sexualities, Evolution & Gender*, 6, 45-53.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions, and Interconnections. In C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*. Berlin: Springer.
- Kolb, B. & Cioe, J. (1996). Sex-related differences in cortical function after medial frontal lesions in rats. *Behavioral Neuroscience*, 110, 1271-1281.
- Kolb, B. & Wishaw, I. Q. (2003). Spatial Behavior. In B. Kolb & I. Q. Wishaw (Eds.), *Fundamentals of Human Neuropsychology*. New York: Worth Publishers.
- Korol, D. L. (2004). Role of estrogen in balancing contributions from multiple memory systems. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82, 309-323.
- Korol, D. L., Malin, E. L., Borden, K. A., Busby, R. A., & Couper-Leo, J. (2004). Shifts in preferred learning strategy across the estrous cycle in female rats. *Hormones and Behavior*, 45, 330-338.
- Korol, D. L., Unick, K., Goosens, K., Crane, C., Gold, P. E., & Foster, T. C. (1994). Estrogen effects on spatial performance and hippocampal physiology in female rats. *Society for Neuroscience Abstracts*, 20, 1436.
- Kritzer, M. F., McLaughlin, P. J., Smirlis, T., & Robinson, J. K. (2001). Gonadectomy Impairs T-Maze Acquisition in Adult Male Rats. *Hormones and Behavior*, 39, 167-174.
- Krug, R., Mölle, M., Fehm, H. L., & Born, J. (1999). Variations across the menstrual cycle in EEG Activity during thinking and mental relaxation. *Journal of Psychophysiology*, 13, 163-172.
- Kunz, M. & Lautenbacher, S. (2007). Demenz bei Frauen und Männern: das gleiche Problem? In S. Lautenbacher, O. Güntürkün & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht*. Berlin: Springer.
- Lalonde, R. & Strazielle, C. (2003). The effects of cerebellar damage on maze learning in animals. *The Cerebellum*, 2, 300-309.
- Lawton, C. A. & Kallai, J. (2002). Gender Differences in Wayfinding Strategies and Anxiety About Wayfinding: A Cross-Cultural Comparison. *Sex Roles*, 47, 389-401.
- Lawton, C. A. & Morrin, K. A. (1999). Gender differences in pointing accuracy in computer-simulated 3D mazes. *Sex Roles*, 40, 73-92.
- Lawton, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30, 765-779.
- Lawton, C. A. (1996). Strategies for indoor wayfinding: The role of orientation. *Journal of Environmental Psychology*, 16, 137-145.
- Lawton, C. A., Charleston, S. I., & Zieles, A. S. (1996). Individual- and gender-related differences in indoor wayfinding. *Environment and Behavior*, 28, 204-219.
- Lee, T. M. C., Liu, H. L., Hung, K. N., Pu, J., Ng, Y. b., Mak, A. K. Y., Gao, J.H. & Chan, C.C.H. (2005). The cerebellum's involvement in the judgment of spatial orientation: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuropsychologia*, 43, 1870-1877.

Literaturverzeichnis

- Levy, L. J., Astur, R. S., & Frick, K. M. (2005). Men and Women Differ in Object Memory but Not Performance of a Virtual Radial Maze. *Behavioral Neuroscience*, *119*, 853-862.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, *56*, 1479-1498.
- Lövden, M., Herlitz, A., Schelenbach, M., Grossman-Hutter, B., Krüger, A., & Lindenberger, U. (2007). Quantitative and qualitative sex differences in spatial navigation. *Scandinavian Journal of Psychology*, *48*, 353-358.
- MacFadden, A., Elias, L., & Saucier, D. (2003). Males and females scan maps similarly, but give directions differently. *Brain and Cognition*, *53*, 297-300.
- Maguire, E. A., Burgess, N., & O'Keefe, J. (1999). Human spatial navigation: cognitive maps, sexual dimorphism, and neural substrates. *Current Opinion in Neurobiology*, *9*, 171-177.
- Maguire, E. A., Burgess, N., Donnett, J. G., Frackowiak, R. S., Frith, C. D., & O'Keefe, J. (1998). Knowing where and getting there: a human navigation network. *Science*, *280*, 921-924.
- Maguire, E. A., Nannery, R., & Spiers, H. J. (2006). Navigation around London by a taxi driver with bilateral hippocampal lesions. *Brain*, *129*, 2894-2907.
- Maier, P. H. (1999). *Räumliches Vorstellungsvermögen*. Donauwörth: Auer.
- Maki, P. M. & Resnick, S. M. (2001). Effects of estrogen on patterns of brain activity at rest and during cognitive activity: a review of neuroimaging studies. *Neuroimage*, *14*, 789-801.
- Malikovic, A., Amunts, K., Schleicher, A., Mohlberg, H., Eickhoff, S. B., Wilms, M., Palomero-Gallagher, N., Armstrong, E. & Zilles, K. (2007). Cytoarchitectonic analysis of the human extrastriate cortex in the region of V5/MT+: a probabilistic, stereotaxic map of area hOc5. *Cerebral Cortex*, *17*, 562-574.
- Malouin, F., Richards, C. L., Jackson, P. L., Dumas, F., & Doyon, J. (2003). Brain activations during motor imagery of locomotor-related tasks: A PET study. *Human Brain Mapping*, *19*, 47-62.
- Matsumoto, A. H. (2000). *Sexual differentiation of the brain*. London: CRC Press.
- May, M. & Klatzky, R. L. (2000). Path integration while ignoring irrelevant movement. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 169-186.
- McCarthy, M. M. (2007). Zelluläre Mechanismen steroidinduzierter Geschlechtsunterschiede im Gehirn. In: S. Lautenbacher, O. Güntürkün & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht*. Heidelberg: Springer.
- McCarthy, R. A., Evans, J. J., & Hodges, J. R. (1996). Topographic amnesia: spatial memory disorder, perceptual dysfunction, or category specific semantic memory impairment? *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, *60*, 318-325.
- McEwen, B. (2002a). Estrogen actions throughout the brain. *Recent Progress in Hormone Research*, *57*, 357-384.
- McEwen, B. (2002b). Estrogen Actions Throughout the Brain. *Recent Progress in Hormone Research*, *57*, 357-384.
- McEwen, B. S. & Alves, S. H. (1999). Estrogen actions in the central nervous system. *Endocrine Reviews*, *20*, 279-307.
- McEwen, B., Akama, K., Alves, S. E., Brake, W. G., Bulloch, K., Lee, S. et al. (2001). Tracking the estrogen receptor in neurons: Implications for estrogen-induced synapse formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*, 7093-7100.

Literaturverzeichnis

- McNamara, T. P. (2003). How Are the Locations of Objects in the Environment Represented in Memory? In C. Freksa (Ed.), *Spatial Cognition III: Routes and Navigation, Human Memory and Learning, Spatial Representation and Spatial Learning*. Berlin: Springer.
- McNamara, T. P., Shelton, A. L., & Shelton, A. L. (2003). Cognitive maps and the hippocampus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 333-335.
- Mellet, E., Bricogne, S., Tzourio-Mazoyer, N., Ghaem, O., Petit, L., Zago, L. et al. (2000). Neural Correlates of Topographic Mental Exploration: The Impact of Route versus Survey Perspective Learning. *NeuroImage*, 12, 588-600.
- Miranda, R., Blanco, E., Begega, A., Rubio, S., & Arias, J. L. (2006). Hippocampal and Caudate Metabolic Activity Associated With Different Navigational Strategies. *Behavioral Neuroscience*, 120, 641-650.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neuroscience*, 6, 414-417.
- Moffat, S. D. & Hampson, E. (1996). A curvilinear relationship between testosterone and spatial cognition in humans: possible influence of hand preference. *Psychoneuroendocrinology*, 21, 323-337.
- Moffat, S. D. & Resnick, S. M. (2007). Long-term measures of free testosterone predict regional cerebral blood flow patterns in elderly men. *Neurobiology of Aging*, 28, 914-920.
- Moffat, S. D., Hampson, E., & Hatzipantelis, M. (1998). Navigation in a "virtual" maze: Sex differences and correlation with psychometric measures of spatial ability in humans. *Evolution and Human Behavior*, 19, 73-89.
- Moffat, S. D., Hampson, E., Wickett, J. C., Vernon, P. A., & Lee, D. H. (1997). Testosterone is correlated with regional morphology of the human corpus callosum. *Brain Research*, 767, 297-304.
- Moffat, S. D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2007). Extrahippocampal contributions to age differences in human spatial navigation. *Cerebral Cortex*, 17, 1274-1282.
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiol. Aging*, 22, 787-796.
- Molinari, M. & Leggio, M. (2007). Cerebellar information processing and visuospatial functions. *The Cerebellum*, 6, 214-220.
- Montello, D. R. & Pick, H. L. (1993). Integrating Knowledge of Vertically Aligned Large-Scale Spaces. *Environment and Behavior*, 25, 457-484.
- Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., & Self, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American Geographers*, 89, 515-534.
- Moody, M. S. (1997). Changes in scores on the Mental Rotations Test during the menstrual cycle. *Perceptual and Motor Skills*, 84, 955-961.
- Morris, R. G. (1984). Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of Neuroscience Methods*, 11, 47-60.
- Muller, M., Aleman, A., Grobbee, D. E., de Haan, E. H. F., & van der Schouw, Y. T. (2005). Endogenous sex hormone levels and cognitive function in aging men: Is there an optimal level? *Neurology*, 64, 866-871.
- Münzer, S. (2007). Individual differences in environmental spatial abilities: The role of visuo-spatial working memory. Paper presented at the SFB/TR8 Spatial Cognition colloquium. Freiburg.
- Naftolin, F., MacLusky, N. J., Leranthe, C. Z., Sakamoto, H. S., & Garcia-Segura, L. M. (1988). The cellular effects of estrogens on neuroendocrine tissues. *Journal of steroid biochemistry*, 30, 195-207.

Literaturverzeichnis

- Naghavi, H. R. & Nyberg, L. (2005). Common fronto-parietal activity in attention, memory, and consciousness: Shared demands on integration? *Consciousness and Cognition*, *14*, 390-425.
- Newcombe, N. S. (2002). Spatial Cognition. In H. Pashler & D. Medin (Eds.), *Steven's Handbook of Experimental Psychology (Vol. 2): Memory and Cognitive Processes*. New York: John Wiley.
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Clarendon Press.
- Ohnishi, T., Matsuda, H., Hirakata, M., & Ugawa, Y. (2006). Navigation ability dependent neural activation in the human brain: An fMRI study. *Neuroscience Research*, *55*, 361-369.
- O'Keefe, J. & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Research*, *34*, 171-175.
- Ostendorf, F. (1990). *Sprache und Persönlichkeit: Zur Validität des Fünf-Faktoren-Modells der Persönlichkeit*. Regensburg: Roederer.
- Oswald, W. D. & Roth, E. (1987). *Der Zahlen-Verbindungs-Test (2. überarbeitete und erweiterte Auflage)*. Göttingen: Hogrefe.
- Ota, H., Fujii, T., Tabuchi, M., Sato, K., Saito, J., & Yamadori, A. (2003). Different spatial processing for stimulus-centered and body-centered representations. *Neurology*, *60*, 1846-1848.
- Owen, A. M., Milner, B., Petrides, M., & Evans, A. C. (1996). Memory for object features versus memory for object location: A positron-emission tomography study of encoding and retrieval processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*, 9212-9217.
- Ozer, D. J. (1987). Personality, intelligence, and spatial visualization: correlates of mental rotations test performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, *53*, 129-134.
- Passingham, R. E., Stephan, K. E., & Kotter, R. (2002). The anatomical basis of functional localization in the cortex. *Nature Reviews: Neuroscience*, *3*, 606-616.
- Pazzaglia, F. & De Beni, R. (2001). Strategies of processing spatial information in survey and landmark-centred individuals. *European Journal of Cognitive Psychology*, *13*, 493-508.
- Pazzaglia, F. & De Beni, R. (2002). Visuo-spatial working memory in navigation. *Applied Cognitive Psychology*, *16*, 35-50.
- Pazzaglia, F., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2000). Differenze individuali nella rappresentazione dello spazio: presentazione di un Questionario autovalutativo [Individual differences in spatial representation: A self-rating questionnaire]. *Giornale Italiano di Psicologia*, *3*, 241-264.
- Peruch, P. & Lapin, E. A. (1993). Route knowledge in different spatial frames of reference. *Acta Psychologica*, *84*, 253-269.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, *28*, 39-58.
- Peters, M., Lehmann, W., Takahira, S., Takeuchi, Y., & Jordan, K. (2006). Mental rotation test performance in four cross-cultural samples (n = 3367): overall sex differences and the role of academic program in performance. *Cortex*, *42*, 1005-1014.
- Pizzamiglio, L., Guariglia, C., & Cosentino, T. (1998). Evidence for separate allocentric and egocentric space processing in neglect patients. *Cortex*, *34*, 719-730.

Literaturverzeichnis

- Pluchino, N., Luisi, M., Lenzi, E., Centofanti, M., Begliuomini, S., Freschi, L. et al. (2006). Progesterone and progestins: Effects on brain, allopregnanolone and [beta]-endorphin. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, *102*, 205-213.
- Pozzo-Miller, L. D., Inoue, T., & Murphy, D. D. (1999). Estradiol Increases Spine Density and NMDA-Dependent Ca²⁺ Transients in Spines of CA1 Pyramidal Neurons From Hippocampal Slices. *Journal of Neurophysiology*, *81*, 1404-1411.
- Quinlan, M. G., Hussain, D., & Brake, W. G. (2008). Use of cognitive strategies in rats: The role of estradiol and its interaction with dopamine. *Hormones and Behavior*, *53*, 185-191.
- Ratcliff, J. (1991). Brain and space: Some deductions from the clinical evidence. In: J. Paillard (Ed.), *Brain and space*. Oxford: Oxford University Press.
- Reusser, K. (1998). Denkstrukturen und Wissenserwerb in der Ontogenese. In F. Klix & H. Spada (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Abteilung Kognition, Band 6: Wissen*. Göttingen: Hogrefe.
- Rissanen, A., Puoliväli, J., van Groen, T., & Riekkinen, P. J. (1999). In mice tonic estrogen replacement therapy improves non-spatial and spatial memory in a water maze task. *Neuroreport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, *10*, 1369-1372.
- Rolls, E.T. & Kesner, R.P. (2006). A computational theory of hippocampal function, and empirical tests of the theory. *Progress in Neurobiology*, *79* (1), 1-48.
- Roof, R. L., Zhang, Q., Glasier, M. M., & Stein, D. G. (1993). Gender-specific impairment on Morris water maze task after entorhinal cortex lesion. *Behavioural Brain Research*, *57*, 47-51.
- Rosenberg, L. & Park, S. (2002). Verbal and spatial functions across the menstrual cycle in healthy young women. *Psychoneuroendocrinology*, *27*, 835-841.
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in "desk-top" virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *3*(2), 143-159.
- Rudick, C. N. & Woolley, C. S. (2001). Estrogen Regulates Functional Inhibition of Hippocampal CA1 Pyramidal Cells in the Adult Female Rat. *Journal of Neuroscience*, *21*, 6532-6543.
- Sakthivel, M., Patterson, P. E., & Cruz-Neira, C. (1999). Gender differences in navigating virtual worlds. *Biomedical Sciences Instrumentation*, *35*, 353-359.
- Sandstrom, N. J., Kaufman, J., & Huettel, S. A. (1998). Males and females use different distal cues in a virtual environment navigation task. *Brain research. Cognitive brain research*, *6*, 351-360.
- Saucier, D. M., Green, S. M., Leason, J., MacFadden, A., Bell, S., & Elias, L. J. (2002). Are sex differences in navigation caused by sexually dimorphic strategies or by differences in the ability to use the strategies? *Behavioral Neuroscience*, *116*, 403-410.
- Saucier, D. M., Shultz, S. R., Keller, A. J., Cook, C. M., & Binsted, G. (2008). Sex differences in object location memory and spatial navigation in Long-Evans rats. *Animal Cognition*, *11*, 129-137.
- Save, E. & Poucet, B. (2000). Hippocampal-parietal cortical interactions in spatial cognition. *Hippocampus*, *10*, 491-499.
- Schadow, J., Jordan, K., Wüstenberg, T., & Jäncke, L. (2004). Individuelle Lösungsstrategien und neuronale Korrelate bei Aufgaben zum räumlichen Denken. Vortrag gehalten auf dem 44. Kongress der DGPs in Göttingen.

Literaturverzeichnis

- Schenk, T., Ellison, A., Rice, N., & Milner, A. D. (2005). The role of V5/MT+ in the control of catching movements: an rTMS study. *Neuropsychologia*, *43*, 189-198.
- Schmitz, S. (1997). Gender-related strategies in environmental development: Effects of anxiety on wayfinding in and representation of a three-dimensional maze. *Journal of Environmental Psychology*, *17*, 215-228.
- Schmitzer-Torbert, N. (2007). Place and Response Learning in Human Virtual Navigation: Behavioral Measures and Gender Differences. *Behavioral Neuroscience*, *121*, 277-290.
- Schönebeck, B., Thanhäuser, J., & Debus, G. (2001). Die Tunnelaufgabe: Eine Methode zur Untersuchung kognitiver Teilprozesse räumlicher Orientierungsleistungen. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, *48*, 339-364.
- Schöning, S., Engelen, A., Kugel, H., Schäfer, S., Schiffbauer, H., Zwitserlood, P. et al. (2007). Functional anatomy of visuo-spatial working memory during mental rotation is influenced by sex, menstrual cycle, and sex steroid hormones. *Neuropsychologia*, *45*, 3203-3214.
- Schubert, R., Ritter, P., Wüstenberg, T., Preuschhof, C., Curio, G., Sommer, W. & Villringer, A. (2008). Spatial Attention Related SEP Amplitude Modulations Covary with BOLD Signal in S1--A Simultaneous EEG--fMRI Study. *Cerebral Cortex*, *pub ahead*.
- Schweizer, K., Herrmann, T., Janzen, G., & Katz, S. (1998). The Route Direction Effect and its Constraints. In C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*. Berlin: Springer.
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C. D., Grasby, P., Frackowiak, R. S. J., & Dolan, R. J. (1994). Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory. *Nature*, *368*, 633-635.
- Shelton, A. L. & Gabrieli, J. D. E. (2002). Neural Correlates of Encoding Space from Route and Survey Perspectives. *Journal of Neuroscience*, *22*, 2711-2717.
- Sherwin, B. B. (2003a). Estrogen and Cognitive Functioning in Women. *Endocrine Reviews*, *24*, 133-151.
- Sherwin, B. B. (2003b). Steroid Hormones and Cognitive Functioning in Aging Men: A Mini-Review. *Journal of Molecular Neuroscience*, *20*, 385-394.
- Siegel, A. W. & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, *10*, 9-55.
- Silverman, I. & Phillips, K. (1993). Effects of estrogen changes during the menstrual cycle on spatial performance. *Ethology and Sociobiology*, *14*, 257-269.
- Silverman, I., Kastuk, D., Choi, J., & Phillips, K. (1999). Testosterone levels and spatial ability in men. *Psychoneuroendocrinology*, *24*, 813-822.
- Slabbekoorn, D., van Goozen, S. H. M., Megens, J., Gooren, L. J. G., & Cohen-Kettenis, P. T. (1999). Activating effects of cross-sex hormones on cognitive functioning: a study of short-term and long-term hormone effects in transsexuals. *Psychoneuroendocrinology*, *24*, 423-447.
- Snihur, A. W. K., Hampson, E., & Cain, D. P. (2008). Estradiol and corticosterone independently impair spatial navigation in the Morris water maze in adult female rats. *Behavioural Brain Research*, *187*, 56-66.
- Spiers, H. J., Burgess, N., Hartley, T., Vargha-Khadem, F., & O'Keefe, J. (2001). Bilateral hippocampal pathology impairs topographical and episodic memory but not visual pattern matching. *Hippocampus*, *11*, 715-725.
- Stephan, K. M., Fink, G. R., Passingham, R. E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A. O., Frith, C. D. & Frackowiak, R.S. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 373-386.

Literaturverzeichnis

- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme.
- Tanaka, N. & Takagi, H. (2004). Virtual Environment Design of Managing Both Presence and Virtual Reality Sickness. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 23, 313-317.
- Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. (1990). Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. *Journal of Neuroscience*, 10, 436-447.
- Thews, G. & Vaupel, P. (1997). *Vegetative Physiologie*. (3. Auflage). Berlin: Springer.
- Thiel, C. M., Zilles, K., & Fink, G. R. (2004). Cerebral correlates of alerting, orienting and reorienting of visuospatial attention: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, 21, 318-328.
- Thomsen, T., Hugdahl, K., Ersland, L., Barndon, R., Lundervold, A., Smievoll, A. I. et al. (2000). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) study of sex differences in a mental rotation task. *Medical Science Monitor*, 6, 1186-1196.
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. Chicago: University of Chicago Press.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55, 189-208.
- Vedder, H. (2007). Geschlechtsspezifische Faktoren bei hirnschädigenden Ereignissen. In S.Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht*. Berlin: Springer.
- Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117, 250-270.
- Ward, S. L., Newcombe, N., & Overton, W. F. (1986). Turn left at the church, or three miles north: A study of direction giving and sex differences. *Environment and Behavior*, 18, 192-213.
- Weiss, E. M., Deisenhammer, E. A., Hinterhuber, H., & Marksteiner, J. (2005). Geschlechtsunterschiede kognitiver Leistungen - populärwissenschaftliche Stereotypen oder evidenzbasierte Studienergebnisse? *Fortschritte der Neurologie · Psychiatrie*, 73, 587-595.
- Weniger, G. & Irle, E. (2006). Posterior parahippocampal gyrus lesions in the human impair egocentric learning in a virtual environment. *European Journal of Neuroscience*, 24, 2406-2414.
- Werner, S., Krieg-Brückner, B., Mallot, H. A., Schweizer, K., & Freksa, C. (1997). Spatial Cognition: The Role of Landmark, Route, and Survey Knowledge in Human and Robot Navigation. In: M.Jarke, K. Pasedach, & K. Pohl (Eds.), *Informatik '97*. Berlin: Springer.
- Werner, S., Saade, C., & Lürer, G. (1998). Relations Between the Mental Representation of Extrapersonal Space and Spatial Behavior. In: C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*. Berlin: Springer.
- Witter, M. P. & Moser, E. I. (2006). Spatial representation and the architecture of the entorhinal cortex. *Trends in Neurosciences*, 29, 671-678.
- Wolbers, T., Weiller, C., & Buchel, C. (2004). Neural foundations of emerging route knowledge in complex spatial environments. *Cognitive Brain Research*, 21, 401-411.
- Wolf, O. T. & Kirschbaum, C. (2002). Endogenous Estradiol and Testosterone Levels Are Associated with Cognitive Performance in Older Women and Men. *Hormones and Behavior*, 41, 259-266.
- Woodin, M. E. & Allport, A. (1998). Independent reference frames in human spatial memory: body-centered and environment-centered coding in near and far space. *Memory & Cognition*, 26, 1109-1116.

Literaturverzeichnis

Woolley, C. S., Weiland, N. G., McEwen, B. S., & Schwartzkroin, P. A. (1997). Estradiol Increases the Sensitivity of Hippocampal CA1 Pyramidal Cells to NMDA Receptor-Mediated Synaptic Input: Correlation with Dendritic Spine Density. *Journal of Neuroscience*, *17*, 1848-1859.

Wraga, M., Duncan, L., Jacobs, E. C., Helt, M., & Church, J. (2006). Stereotype susceptibility narrows the gender gap in imagined self-rotation performance. *Psychonomic Bulletin & Review*, *13*, 813-819.

Xiao, L. & Becker, J. B. (1994). Quantitative microdialysis determination of extracellular striatal dopamine concentration in male and female rats: effects of estrous cycle and gonadectomy. *Neuroscience Letters*, *180*, 155-158.

Zachle, T., Jordan, K., Wüstenberg, T., Baudewig, J., Dechent, P., & Mast, F. W. (2007). The neural basis of the egocentric and allocentric spatial frame of reference. *Brain Research*, *1137*, 92-103.

Zhao, C., Fujinaga, R., Yanai, A., Kokubu, K., Takeshita, Y., Watanabe, Y. et al. (2008). Sex-steroidal regulation of aromatase mRNA expression in adult male rat brain: a quantitative non-radioactive in situ hybridization study. *Cell and Tissue Research*, *332*, 381-391.

Zurkovsky, L., Brown, S. L., Boyd, S. E., Fell, J. A., & Korol, D. L. (2007). Estrogen modulates learning in female rats by acting directly at distinct memory systems. *Neuroscience*, *144*, 26-37.

Anhang

A Zustimmung der Ethikkommission zu den Studien

B Alltags-Strategie-Skala (ASS)

C Fragebogen zur Computererfahrung

D Fragebogen zu Strategien im Virtuellen Labyrinth (maze-FB)

E deutsche Version des Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (dQSR)

F Instruktion Virtuelles Labyrinth Studie 1 und 3

G Instruktion MR-Studie

H Information und Einverständniserklärung zur fMRI-Untersuchung

I Prinzipien der MRI und der fMRI

J Tabelle der aktivierten anatomische Strukturen Navigation gegen Baseline in Studie 2 über alle 22 Pbn

K Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Kontrolle in Studie 2 über alle 22 Pbn

L Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Baseline in Studie 2 über alle 11 Männer

M Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Kontrolle in Studie 2 über alle 11 Männer

N Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Baseline in Studie 2 über alle 7 Frauen

O Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Kontrolle in Studie 2 über alle 7 Frauen

P Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Baseline in Studie 2 über alle 5 Pbn mit externaler Navigationsstrategie

Q Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Kontrolle in Studie 2 über alle 5 Pbn mit externaler Navigationsstrategie

R Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Baseline in Studie 2 über alle 10 Pbn mit internaler Navigationsstrategie

S Tabelle der aktivierten anatomischen Strukturen Navigation gegen Kontrolle in Studie 2 über alle 10 Pbn mit internaler Navigationsstrategie

Anhang A: Genehmigung der fMRI-Studie durch die Ethik-Kommission

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN



DER VORSITZENDE DER ETHIK-KOMMISSION

ETHIK-KOMMISSION DER MED. FAKULTÄT, ROBERT-KOCH-STR. 40, 37075 GÖTTINGEN

Frau
Dr. med. Kirsten Jordan
Abt. Medizinische Psychologie und
Medizinische Soziologie

Waldweg 37

Robert-Koch-Straße 40
D-37075 Göttingen
Telefon: Referent/in +49(0)551 39-86 44
Sekretariat +49(0)551 39-66 29
Telefax: +49(0)551 39-95 36
Internet: www.mi.med.uni-goettingen.de/ethik
E-Mail: ethik@med.uni-goettingen.de
Datum:

8. 6. 2007 b-we-f

Antragsnummer: 39/3/07 (bitte stets beim Schriftwechsel angeben)
Studientitel: Entwicklung und Validierung von neuen fMRT-Paradigmen zur Untersuchung des Einflusses von Sexualhormonen auf die kortikalen Korrelate verbaler und räumlicher kognitiver Funktionen
Antragstellerin: Dr. med. Kirsten Jordan, Abt. für Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie


Sehr geehrte Frau Kollegin Jordan,

wir bestätigen den Eingang Ihres Schreibens am 16.05.2007. Nach Ergänzung der vorliegenden Dokumente und Beantwortung der im vorläufigen Votum aufgeführten Fragen bestehen nunmehr keine ethischen und rechtlichen Bedenken gegen die Durchführung des oben genannten Forschungsvorhabens.

Wir wünschen viel Erfolg bei der Durchführung Ihres Projektes.

Die Ethik-Kommission weist darauf hin, dass die ärztliche und juristische Verantwortung bei den jeweiligen Prüfarzten verbleibt. An der Beratung und Beschlussfassung haben die im Anhang aufgeführten Mitglieder der hiesigen Ethik-Kommission teilgenommen. Es wird bestätigt, dass Prüfarzte, die an der o.g. Studie beteiligt sind, nicht an der Abstimmung teilgenommen haben. Die zustimmende Bewertung ist für die im Anhang aufgeführten Personen/Einrichtungen gültig. Auf die Einhaltung einschlägiger Gesetze und Rechtsvorschriften wird hingewiesen. Die nach Rechtslage notwendigen Unterrichtungen (u. A. Prüfplanänderungen, entsprechende Zwischenfallsereignisse, neue Datenlage, Abschlussbericht) sind den jeweils zuständigen Ethik-Kommissionen unverzüglich vorzulegen. Die Ethik-Kommission bestätigt, dass sie auf Grundlage nationaler Gesetze, Vorschriften sowie der GCP/ICH-Richtlinie arbeitet. Gegen den vorliegenden Bescheid kann innerhalb von einem Monat nach Bekanntmachung Widerspruch erhoben werden. Der Widerspruch ist schriftlich oder zur Niederschrift der Geschäftsstelle bei der Geschäftsstelle der Ethik-Kommission der Georg-August-Universität Göttingen, Robert-Koch-Str. 40, 37075 Göttingen einzureichen und mit einer Begründung zu versehen.

Mit freundlichen Grüßen


Prof. Dr. med. J. Brockmöller
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Anhang B: Alltags-Strategie-Skala (ASS)

Alltags-Strategie-Skala modifiziert nach Fitting, Glück & Brehm (2001)

Im folgenden Fragebogen stehen 16 Aussagen, die das alltägliche Vorgehen beim Orientieren z.B. in einer Stadt beschreiben können und für die Sie einschätzen sollen, inwieweit sie auf Sie persönlich zutreffen. Sie können Ihre Einschätzung auf einer Skala von 1 bis 5 vornehmen, wobei 1 „trifft überhaupt nicht auf mich zu“ und 5 „trifft voll und ganz auf mich zu“ bedeutet. Bitte überlegen Sie so genau wie möglich, wie Sie sich normalerweise in einer Umgebung zurecht finden und seien Sie beim Ausfüllen bitte möglichst ehrlich. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.

1. Ich merke mir Orte oder auffällige Punkte wie Gebäude oder Denkmäler, an denen ich auf meinem Weg vorbei komme.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

2. Wenn ich mich in einer neuen Umgebung verabrede, möchte ich wissen, wie viele Straßen ich überqueren muss, bevor ich gegebenenfalls abbiegen soll

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

3. Wenn ich mich nach einer bestimmten Strecke erkundige, frage ich meist nach, wie lange ich geradeaus fahren oder gehen muss bevor ich abbiege und an welchen Punkten ich rechts und links abbiegen muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

4. Ich merke mir, wenn ich losgehe, in welcher Beziehung ich mich zum Stadtzentrum befinde.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Anhang B: Alltags-Strategie-Skala (ASS)

5. Wenn ich in einer Umgebung unterwegs bin, mache ich mir ein Bild von dem Gebiet in Form einer Landkarte.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

6. In einer mir unbekanntem Umgebung benutze ich eine offizielle Straßenkarte.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

7. Um mich nicht zu verlaufen, setze ich meinen eigenen Standpunkt in Beziehung zur Sonne (oder dem Mond).

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

8. Ich merke mir die Himmelsrichtung (Norden, Süden, Osten, Westen), in der ich gehe oder fahre.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

9. Wenn ich mit dem Auto oder Fahrrad unterwegs bin, nehme ich nicht immer die gleiche Strecke, um die zurück gelegten Kilometer vergleichen zu können.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

10. Wenn ich mich in einer neuen Umgebung verabrede, frage ich, in welche Richtung (Norden, Süden, Osten, Westen) ich an bestimmten Straßen gehen muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○-----○	-----○	-----○	-----○	-----○	-----○

Anhang B: Alltags-Strategie-Skala (ASS)

11. Wenn ich mich in einer mir neuen Umgebung verabrede, dann lasse ich mir den genauen Weg aufzeichnen.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
O-----O-----O-----O-----O					

12. Bevor ich mit dem Auto oder Fahrrad losfahre, versuche ich mir die Punkte oder Gebäude zu merken, an denen ich links oder rechts abbiegen muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
O-----O-----O-----O-----O					

13. Um mich nicht zu verlaufen, behalte ich meistens die Strecke zwischen dem Ort, an dem ich mich zuletzt aufgehalten habe und dem Ort, an dem ich abbiege im Gedächtnis.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
O-----O-----O-----O-----O					

14. Ich merke mir, wenn ich losgehe, in welcher Richtung ich mich zu meinem Ausgangspunkt befinde.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
O-----O-----O-----O-----O					

15. Wenn ich mit dem Auto oder Fahrrad fahre, merke ich mir die Anzahl der zu überquerenden Straßen bevor ich abbiegen muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
O-----O-----O-----O-----O					

Anhang B: Alltags-Strategie-Skala (ASS)

16. Wenn ich mich in einer mir neuen Umgebung verabrede, frage ich, an welchen Punkten ich rechts oder links abbiegen muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Vielen Dank!

Anhang C: Fragebogen zur Computererfahrung

Im Folgenden stehen 8 Aussagen, die den Umgang mit Computern und die Erfahrung damit beschreiben können. Sie sollen für sich entscheiden, inwieweit diese Aussagen auf Sie zutreffen. Sie können Ihre Einschätzung auf einer Skala von 1 bis 5 vornehmen, wobei 1 „trifft überhaupt nicht auf mich zu“ und 5 „trifft voll und ganz auf mich zu“ bedeutet. Seien Sie beim Ausfüllen bitte möglichst ehrlich. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.

Ich arbeite sehr viel mit dem Computer.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0-----0-----0-----0					

Ich spiele sehr häufig Computerspiele.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0-----0-----0-----0					

Ich habe schon oft sog. Ego-Shooter-Spiele gespielt.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0-----0-----0-----0					

Das Durchlaufen einer virtuellen Welt ist mir vertraut.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0-----0-----0-----0					

Der Umgang mit dem Joystick ist mir sehr vertraut.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0-----0-----0-----0					

Anhang C: Fragebogen zur Computererfahrung

Ich habe auch früher schon öfter mit einem Joystick gespielt oder ähnliches.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Ich spiele am Computer v.a. schnelle Spiele.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Der Umgang mit Computern ist mir sehr vertraut.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Anhang D: Fragebogen zu Strategien im Virtuellen Labyrinth (maze-FB)

Im Folgenden stehen 6 Aussagen, die ein mögliches Vorgehen beim Orientieren in dem Labyrinth beschreiben können und für die Sie einschätzen sollen, inwieweit sie auf Sie persönlich zugetragen haben. Sie können Ihre Einschätzung auf einer Skala von 1 bis 5 vornehmen, wobei 1 „trifft überhaupt nicht auf mich zu“ und 5 „trifft voll und ganz auf mich zu“ bedeutet. Bitte überlegen Sie so genau wie möglich, wie Sie sich zurecht gefunden haben und seien Sie beim Ausfüllen bitte möglichst ehrlich. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.

Ich habe mich an dem Turm, den Häusern, dem Berg und/oder den Windrädern orientiert.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0	-----0	-----0	-----0	-----0	-----0

Ich habe mir das Muster meines Weges wie einen Pfad gemerkt.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0	-----0	-----0	-----0	-----0	-----0

Ich habe mir gemerkt, ob sich die Tür links oder rechts von einem der äußeren Objekte befindet.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0	-----0	-----0	-----0	-----0	-----0

Ich habe mir die Form des Labyrinths vorgestellt.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
0-----0	-----0	-----0	-----0	-----0	-----0

Anhang D: Fragebogen zu Strategien im Virtuellen Labyrinth (maze-FB)

Ich habe mir innerlich vorgesagt, wie ich laufen muss, um zum Ziel zu gelangen oder was ich beachten muss.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Ich wusste immer genau, wo sich relativ zu mir mein Ausgangspunkt befindet.

Trifft überhaupt nicht auf mich zu.					Trifft voll und ganz auf mich zu.
1	2	3	4	5	
○	○	○	○	○	○

Und schließlich möchten wir Sie noch bitten, einmal das Labyrinth so genau wie möglich aufzuzeichnen und markante Punkte wie Turm, Windräder, Berg und Skyline mit einzuzichnen.

Anhang E: deutsche Version des Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (dQSR)

Fragebogen Räumliche Repräsentationen

(Version 1.0 vom 6.Nov.2006)

Anleitung: In diesem Fragebogen geht es um räumliche Orientierung und Repräsentation. Bitte kreuzen Sie jeweils die für Sie am besten passende Antwortalternative an. Lesen Sie die Fragen bitte sorgfältig durch und achten Sie darauf, alle Fragen zu beantworten.

	(überhaupt nicht) ----- (sehr / sehr gut)
	1 2 3 4 5
	○ ○ ○ ○ ○
1. Denken Sie, dass Sie einen guten Orientierungssinn haben?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
2. Denken Familienmitglieder oder Freunde von Ihnen, dass Sie einen guten Orientierungssinn haben?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
3. Stellen Sie sich vor, wie Sie sich in verschiedenen Umgebungen orientieren. Würden Sie sich als eine Person beschreiben, die...	
a) ...sich orientiert, indem sie sich an bekannte Wege erinnert, die Orte miteinander verbinden?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
b) ...sich orientiert, indem sie nach Ihr bekannten Punkten oder Plätzen (Gebäuden, Geschäften, Denkmäler usw.) schaut?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
c) ...versucht, sich die Umgebung ähnlich wie auf einer Karte (aus der Vogelperspektive) vorzustellen?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
4 Denken Sie an eine Ihnen nur wenig vertraute Stadt und versuchen Sie, sich diese Stadt vorzustellen.	
An welche Stadt denken Sie?	Schreiben Sie hier den Namen der Stadt auf: -----
Jetzt versuchen Sie bitte anzugeben, wie Sie sich die Stadt vorstellen:	
a) Ich stelle mir die Stadt aus einer „Vogelperspektive“ vor, ähnlich wie auf einer Karte.	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
b) Ich stelle mir Strecken oder Weg(e) durch die Stadt vor, an die ich mich erinnern kann.	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
c) Ich stelle mir einzelne auffällige Punkte und Plätze vor (z.B. Denkmäler, Gebäude, Kreuzungen, etc.), an die ich mich erinnern kann.	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○
5. Wenn Sie sich in natürlichem, offenem Gelände (Berge, Küste, Land) befinden, wissen Sie dann, wo Norden, Süden, Osten und Westen ist?	1 2 3 4 5 ○ ○ ○ ○ ○

Anhang E: deutsche Version des Fragebogen zu räumlichen Repräsentationen (dQSR)

	(überhaupt nicht) ----- (sehr / sehr gut)
	1 2 3 4 5
	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
6. Wenn Sie in der Stadt sind, die Ihnen am besten vertraut ist, können Sie dann mühelos angeben, wo Norden, Süden, Osten und Westen ist?	1 2 3 4 5 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
7. Jemand gibt Ihnen eine Wegbeschreibung zu einem Ihnen unbekanntem Ort. Werden Sie eher:	
a) sich den Weg bildhaft im Kopf vorstellen?	1 2 3 4 5 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
b) Sich die sprachliche Wegschreibung merken?	1 2 3 4 5 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
8. Können Sie sich in einem komplexen Gebäude (Einkaufszentrum, Museum, etc.) spontan und ohne Probleme Ihre Ausrichtung (Orientierung) in Bezug auf die Gebäudestruktur und die äußere Umgebung vorstellen?	1 2 3 4 5 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
9. Wenn Sie sich in einem Gebäude befinden, können Sie sich ohne weiteres bildhaft vorstellen, was außerhalb des Gebäudes in Ihrer Blickrichtung liegt?	1 2 3 4 5 <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
10. Wenn Sie im Freien sind und gebeten werden, eine Himmelsrichtung (Norden, Süden, Westen, Osten) anzuzeigen:	(bitte hier nur eine Möglichkeit ankreuzen)
a) Zeigen Sie diese sofort?	<input type="radio"/>
b) Müssen Sie nachdenken, bevor Sie sie zeigen?	<input type="radio"/>
c) Haben Sie Schwierigkeiten?	<input type="radio"/>
11. Wenn Sie sich in einem komplexen Gebäude (mehrere Stockwerke, Treppen, Gänge) befinden und gebeten werden, zum Eingang zu zeigen:	(bitte hier nur eine Möglichkeit ankreuzen)
a) Zeigen Sie sofort dahin?	<input type="radio"/>
b) Müssen Sie nachdenken, bevor Sie dahin zeigen?	<input type="radio"/>
c) Haben Sie Schwierigkeiten?	<input type="radio"/>

Ich bin _____ Jahre alt.

Ich bin weiblich männlich

Anhang F: Instruktion Virtuelles Labyrinth Studie 1 und 3

Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,

Vielen Dank noch einmal, dass Sie an diesem Versuch teilnehmen!

In diesem Versuchsteil soll es darum gehen, Orientierungsleistung zu messen.

Mit **Orientierung** ist gemeint, wie sich jemand in einer Umgebung zurecht findet. Dies soll mit Hilfe eines **virtuellen Labyrinths** gemessen werden.

Es handelt sich um ein Labyrinth aus Backsteinmauern, in denen Türen eingelassen sind.

Es wird Ihre Aufgabe sein, so schnell und direkt wie möglich **den Ausgang** aus diesem virtuellen Labyrinth zu **finden**. Der Ausgang ist eine sich öffnende Tür. Alle anderen Türen öffnen sich nicht.

Es gibt für Sie **keinerlei zeitliche Begrenzung**. Jeder Durchgang dauert genau so lange bis Sie den Ausgang gefunden haben.

Dass Sie den richtigen Ausgang gefunden haben, merken Sie daran, **dass sich die Tür öffnet, sobald Sie an sie heran treten**.

Eine Testung besteht aus **vier Durchgängen**, in denen Sie (zunächst durch Ausprobieren) den richtigen Ausgang finden lernen. In allen vier Durchgängen ist immer die gleiche Tür „richtig“.

Versuchen Sie bitte, spätestens im vierten Durchgang die richtige Tür direkt und mit möglichst wenig Zeitverlust anzusteuern.

Vor jedem Durchgang wird Ihnen auf dem Monitor mitgeteilt werden, welcher Durchgang nun folgt (z.B. Durchgang 3).

Von diesen **Testungen** (mit jeweils vier Durchgängen) wird es wiederum 4 geben. Also gibt es insgesamt 4 (Testungen) mal 4 (Durchgänge) = 16 Durchgänge. Während innerhalb einer Testung immer die gleiche Tür richtig ist, ist es in den verschiedenen Testungen natürlich immer eine andere.

Vor jeder Testung steht auf dem Monitor „Bitte Labyrinth auswählen“. Bitte fragen Sie dann jeweils die Versuchsleiterin, welches Sie auswählen sollen und wählen dieses dann mittels Tastendruck auf der Ziffernleiste aus.

Sie bewegen sich mittels **Joystick** durch das Labyrinth.

Aufgrund der möglicherweise ungewohnten Bedienung mittels Joystick können die Bewegungen manchmal abgehackt wirken. Zusätzlich kann das Gleichgewichtsorgan irritiert sein, da zwar das Auge „meldet“ Sie würden sich bewegen, Sie es aber nicht „fühlen“.

Deswegen kann es in Ausnahmefällen zu leichter Übelkeit kommen, ähnlich der beim Bus-, Auto- oder Schifffahren. Man spricht hier von *Simulator Sickness*.

Sollte das bei Ihnen der Fall sein, scheuen Sie sich nicht, dies der Versuchsleiterin mitzuteilen. Sie können dann entweder eine Pause einlegen oder sogar den Versuch ganz abbrechen.

Beachten Sie, dass Sie die Gänge des virtuellen Labyrinths am besten **mittig** durchlaufen, dann ecken Sie an Abbiegungen nicht so schnell an. Wenn Sie gegen eine Wand laufen, dann prallen Sie von dieser ab. Das kann zunächst ungewohnt sein, hilft Ihnen aber zu merken, wann Sie z.B. mit dem Rücken an einer Wand stehen.

Sollten Sie jetzt noch Fragen haben, so stellen Sie diese bitte jetzt!

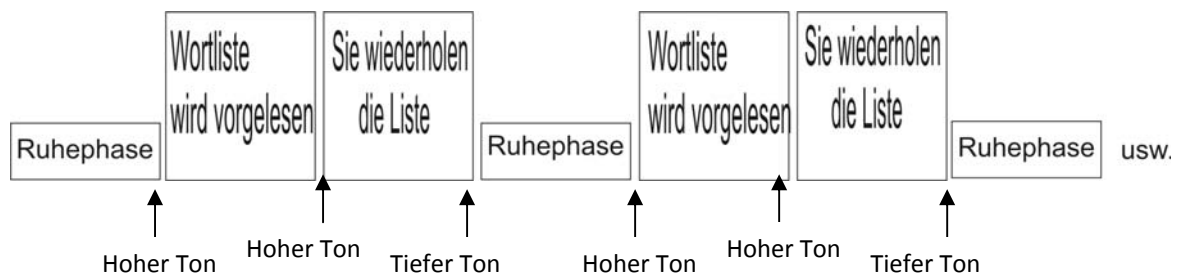
Anhang G: Instruktion MR-Studie

Liebe Teilnehmerin, lieber Teilnehmer,

Vielen Dank noch einmal, dass Sie an diesem Versuch teilnehmen!

Zur Erinnerung möchten wir Ihnen noch einmal den Versuchsablauf kurz beschreiben.

Ihre erste Aufgabe wird eine zum **sprachlichen Gedächtnis** sein. Es wird Ihnen über Kopfhörer eine Liste von Wörtern vorgelesen, die Sie sich bitte **so gut wie möglich einprägen**. Nachdem die Liste vorgelesen wurde, geben Sie die Liste bitte nach einem hohen Tonsignal so gut wie möglich wieder. Die Reihenfolge der Wörter spielt dabei keine Rolle, wiederholen Sie aber möglichst kein Wort. Sie haben 30 Sekunden Zeit die Liste zu wiederholen. Ein tiefer Ton fordert Sie auf, das Sprechen wieder einzustellen. Sollten Sie noch nicht alle Wörter genannt haben, brechen Sie die Aufzählung bitte dennoch ab. Dass eine weitere Liste vorgelesen wird, wird Ihnen über einen hohen Ton angekündigt. Schematisch sieht der Ablauf etwa so aus:



Während dieses Versuches wird die ganze Zeit die MR-Messung laufen. Deswegen ist es **um Sie herum sehr laut**. Sie müssen sich deswegen gut auf das konzentrieren, was Ihnen gesagt wird. Sollten Sie nichts hören können, bitten wir Sie unbedingt, dies den Versuchsleitern über das Mikrofon mitzuteilen.

Bitte versuchen Sie, während Sie sprechen den Kopf so wenig wie möglich zu bewegen. Um eine zu starke Bewegung zu verhindern, bitten wir Sie ebenfalls, nicht allzu laut zu sprechen, obwohl Sie sich dann womöglich selber nicht gut hören können. Ferner versuchen Sie bitte, den Kiefer beim Sprechen so wenig wie möglich zu bewegen.

Nach diesem sprachlichen Test folgt die **Labyrinthaufgabe**.

In dem Labyrinth soll es darum gehen, Orientierungsleistung zu messen. Es handelt sich um das Labyrinth aus Backsteinmauern, das Sie bereits kennen gelernt haben.

Es wird Ihre Aufgabe sein, so schnell und direkt wie möglich **den Ausgang** aus diesem virtuellen Labyrinth zu **finden**.

Es gibt für Sie auch heute **keinerlei zeitliche Begrenzung**. Jeder Durchgang dauert genau so lange bis Sie den Ausgang gefunden haben. Dass Sie den richtigen Ausgang gefunden haben, merken Sie daran, **dass sich die Tür öffnet, sobald Sie an sie heran treten**.

Anhang G: Instruktion MR-Studie

Jede **Testung** besteht aus **vier Durchgängen**, in denen Sie (zunächst durch Ausprobieren) den richtigen Ausgang finden lernen. In allen vier Durchgängen ist immer die gleiche Tür „richtig“.

Versuchen Sie bitte, spätestens im vierten Durchgang die richtige Tür direkt und mit möglichst wenig Zeitverlust anzusteuern.

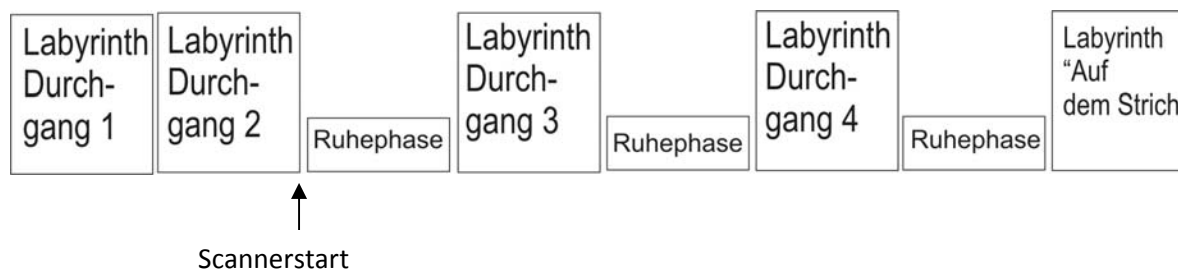
Nach diesem vierten Durchgang folgt ein weiterer, fünfter Durchgang, in dem Sie keine Tür mehr ansteuern müssen, sondern lediglich auf einer weißen Linie auf dem Boden entlanglaufen sollen.

Vor jedem Durchgang wird Ihnen auf dem Monitor mitgeteilt werden, welcher Durchgang nun folgt (z.B. Durchgang 3).

Der Versuch besteht aus **vier solcher Testungen**, also $4 \times 5 = 20$ Durchgänge.

Die fMRT-Messung startet ab dem dritten Durchgang. Ab diesem Zeitpunkt wird es längere Pausen zwischen den Durchgängen geben. Das ist aus messtechnischen Gründen notwendig. Sie werden dann in der Mitte des Bildschirms ein Fixationskreuz sehen, das Sie dann bitte anschauen.

Schematisch sieht der Ablauf einer der vier Testungen etwa so aus:



Sie bewegen sich wieder mittels **Joystick** durch das Labyrinth.

Aufgrund der möglicherweise ungewohnten Bedienung mittels Joystick gerade im MRT, können die Bewegungen manchmal abgehackt wirken. Zusätzlich kann das Gleichgewichtsorgan irritiert sein, da zwar das Auge „meldet“ Sie würden sich bewegen, Sie es aber nicht „fühlen“.

Deswegen kann es in Ausnahmefällen zu leichter Übelkeit kommen, ähnlich der beim Bus-, Auto- oder Schifffahren. Man spricht hier von *Simulator Sickness*.

Sollte das bei Ihnen der Fall sein, scheuen Sie sich nicht, dies den Versuchsleitern über das Mikrofon mitzuteilen. Sie können dann entweder eine Pause einlegen oder sogar den Versuch ganz abbrechen.

Beachten Sie, dass Sie die Gänge des virtuellen Labyrinths am besten **mittig** durchlaufen, dann ecken Sie an Abbiegungen nicht so schnell an. Wenn Sie gegen eine Wand laufen, dann prallen Sie von dieser ab. Das kann zunächst ungewohnt sein, hilft Ihnen aber zu merken, wann Sie z.B. mit dem Rücken an einer Wand stehen.

Sollten Sie jetzt noch Fragen haben, so stellen Sie diese bitte jetzt!

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Bereich Humanmedizin, Medizinische Fakultät

Zentrum für Psychosoziale Medizin, Abteilung für Medizinische Psychologie
und Medizinische Soziologie



Dr. Kirsten Jordan, Kathrin Behrens, Sophie Hinrichs, Abteilung für Medizinische Psychologie und
Medizinische Soziologie

Hausanschrift:
Waldweg 37
37073 Göttingen

Tel.: (0551) 39-13467 / 3913460

Sekr. 39-8192

Fax: 39-13558

E-mail: kirsten.jordan@med.uni.goettingen.de

Informationen zur Studie:

**Untersuchung des Einflusses von Sexualhormonen
auf kognitive Funktionen**

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

Sie sind interessiert an der oben genannten Untersuchung mitzuwirken. Hierfür zunächst einmal vielen Dank!

Die Studie hat zum Ziel, räumliche (räumliche Navigation) und verbale Leistungen (sprachliches Gedächtnis) und die dabei aktivierten neuronalen Netzwerke mittels funktioneller Magnetresonanztomographie zu untersuchen. Weiterhin soll geprüft werden, inwieweit Sexualhormone diese Leistungen, sowie die neuronalen Aktivierungen beeinflussen. Diese Untersuchungen werden ca. 2h dauern.

Sie hat folgende Elemente:

1. Vorgespräch
Erläuterung des Untersuchungsablaufes, Ausfüllen der Fragebögen zur Untersuchung, Händigkeitstest, Test zur Mentalen Rotation, Training in den verbalen und räumlichen Aufgaben.
2. Erste Speichel- und Blutprobe
Folgende Hormone werden bestimmt: Östrogen, Progesteron, Testosteron
3. fMRT-Untersuchung
Im beiliegenden Informationsblatt (und Einverständniserklärung) werden Sie über die Einzelheiten solch einer Untersuchung informiert. Diese Art von Untersuchung ist schmerzlos und birgt nach bisherigen Erkenntnissen keinerlei Gesundheitsrisiken. Eine Gefährdung liegt nur für bestimmte Risikogruppen vor, z.B. bei Personen mit angegriffenem Herz-Kreislauf-System. Ferner muss darauf geachtet werden, dass sich keine metallischen Gegenstände an oder in Ihrem Körper (z.B. Herzschrittmacher,

Implantate) befinden. In einem solchen Fall birgt die MRT sehr wohl z. T. erhebliche Gefahren. So können beispielsweise im Magnetfeld Knochenschrauben verdreht oder Gefäßclips gelöst werden. Zahnfüllungen (z.B. Goldkronen) sind hingegen unbedenklich. Während der Untersuchung wird zum einen eine ca. 7-minütige Messung zur anatomische Aufnahme Ihres Gehirns gemacht. Danach folgen die Messungen mittels der funktionellen Magnetresonanz-Tomographie bei denen wir die Durchblutungsänderungen in Ihrem Gehirn messen. Weiterhin werden Sie die verbalen und räumlichen Aufgaben durchführen. Die Stimuli werden Ihnen über eine spezielle Brille präsentiert.

4. Zweite Speichel- und Blutprobe

Folgende Hormone werden bestimmt: Östrogen, Progesteron, Testosteron

5. Nachbesprechung

Wir möchten Ihnen einige Fragen zu Ihrem subjektiven Eindruck beim Lösen der Aufgabe stellen und Ihnen einen Fragebogen vorlegen. Darin möchten wir insbesondere wissen, wie Sie die Aufgaben gelöst haben.

In Ausnahmefällen kann es in dem Test zur räumlichen Orientierung (virtuelles Labyrinth) aufgrund der möglicherweise ungewohnten Bedienung mittels Joystick zu einer leichten Irritation Ihres Gleichgewichtsorgan kommen, da zwar das Auge „meldet“ Sie würden sich bewegen, Sie es aber nicht „fühlen“. Deswegen kann es in Ausnahmefällen zu leichter Übelkeit kommen, ähnlich der beim Bus-, Auto- oder Schifffahren. Man spricht hier von *Simulator Sickness*. Sollte das bei Ihnen der Fall sein, scheuen Sie sich nicht, dies dem Versuchsleiter mitzuteilen. Sie können dann ggf. auch den Versuch abbrechen.

Die von Ihnen angegebenen persönlichen Daten, sowie Ihre Testergebnisse werden nur von den Untersuchungsleitern einsehbar sein und nicht an Dritte weitergegeben. Ihre Testergebnisse werden von Ihren persönlichen Daten getrennt aufbewahrt.

Wenn Sie sich bereit erklären, an dieser Studie teilzunehmen, möchten wir Sie bitten, die beiliegende Einverständniserklärung zu lesen, auszufüllen und zu unterschreiben. Für die Untersuchungen im Magnetresonanz-Tomographen erhalten Sie einen zusätzlichen Fragebogen und eine Einwilligungserklärung.

Vielen Dank

Dr. Kirsten Jordan, Sophie Hinrichs, Kathrin Behrens

Projektleiter

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Bereich Humanmedizin, Medizinische Fakultät

Zentrum für Psychosoziale Medizin, Abteilung für Medizinische Psychologie
und Medizinische Soziologie



Dr. Kirsten Jordan, Kathrin Behrens, Sophie Hinrichs, Abteilung für Medizinische Psychologie und
Medizinische Soziologie

Hausanschrift:
Waldweg 37
37073 Göttingen

Tel.: (0551) 39-13467 / 3913460

Sekr. 39-8192

Fax: 39-13558

E-mail: kirsten.jordan@med.uni.goettingen.de

Einverständniserklärung

Name, Vorname

Hiermit willige ich in die Teilnahme an der geplanten Untersuchung zum Erfassen unterschiedlicher Leistungen in Bezug auf verbale und räumliche Fähigkeiten, sowie des Einflusses von Sexualhormonen auf diese Prozesse ein. Ich bin über die Inhalte der Untersuchung und den Zweck der Speichel- und Blutproben informiert worden und konnte Fragen zu möglichen Risiken etc. stellen.

Mir ist bekannt, dass bei dieser Untersuchung personenbezogene Daten über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung der Angaben über meine Gesundheit erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor der Teilnahme an der Untersuchung folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, d.h. ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an den Untersuchungen teilnehmen.

Mir ist bekannt, dass ich meine Einwilligung jederzeit und ohne Angaben von Gründen widerrufen kann. Ich weiß, dass die bei Untersuchungen mit mir gewonnenen Daten mit Computern weiterverarbeitet und eventuell für wissenschaftliche Veröffentlichungen verwendet werden sollen. Hiermit bin ich einverstanden, wenn die Verarbeitung und Veröffentlichung in einer Form erfolgt, die eine Zuordnung zu meiner Person ausschließt. Auch diese Einwilligung kann ich jederzeit ohne Angaben von Gründen widerrufen.

Ort

Datum

Unterschrift des Probanden/ der Probandin

Ort, Datum

Unterschrift des Institutsmitarbeiters, der das Informationsgespräch geführt hat

Prinzipien der Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRI)ⁱ basiert auf der kernmagnetischen Resonanz (*Nuclear Magnetic Resonance*, NMR), deren Grundprinzip bereits 1946 von Bloch, sowie Purcell, Torrey und Pound beschrieben wurde. Lauterbur (1973) erstellte dann die ersten, wenngleich noch recht verschwommenen MR-tomographischen Bilder auf der Basis ortskodierter NMR-Signale und 1976 wurden die ersten in vivo-Messungen am Menschen durchgeführt (Mansfield & Maudsley, 1976).

Kernspin und das Magnetfeld

Atomkerne mit einer ungeraden Zahl von Protonen besitzen einen Eigendrehimpuls, den sog. Kernspin, das heißt der Kern dreht sich um die eigene Achse. Durch diese Eigenrotation des Kerns wird ein schwaches Magnetfeld erzeugt. Der Kern kann deshalb modellhaft als Dipolmagnet mit einem magnetischen Moment begriffen werden (Abb. I). Das magnetische Moment resultiert aus der Kombination von Ladung und Rotation. Durch diese magnetische Eigenschaft ist es möglich, die Kerne während des Messprozesses physikalisch zu beeinflussen.



Abb.I: Der Drehimpuls eines Atomkerns erzeugt ein Magnetfeld. Durch die Drehung des Kerns entstehen zwei Pole: Nord- und Südpol. Die Magnetisierung wird durch Pfeile dargestellt, wobei die Pfeilspitze in Richtung des Nordpols weist (Abbildung durch T. Wüstenberg)

Der einfachste Atomkern mit Kernspin, der gleichzeitig das größte magnetische Moment aufweist, ist der Wasserstoffkern (H^+) mit nur einem Proton. Darum eignen sich die Wasserstoffkerne besonders für die Messungen mittels MRI. Da Wasser das häufigste Element im menschlichen Körper ist, kommen Wasserstoffkerne auch in großer Menge im menschlichen Körper vor und können für die MR-Bildgebung genutzt werden.

Wie sich die Wasserstoffkerne nun ausrichten, während sie rotieren, ist zufällig und darum ordnen sich auch die magnetischen Momente der Wasserstoffkerne im menschlichen Körper zufällig im Raum an, so dass sich deren magnetischen Momente immer kompensieren (vgl. Abb.

ⁱ von *magnetic resonance imaging*

II). Darum ist der menschliche Körper in seiner Gesamtheit nicht magnetisch. Seine so genannte Nettomagnetisierung M ist nach außen hin 0.

Durch ein von außen auf die Kerne einwirkendes starkes magnetisches Feld (B_0), richten sich die Kerne jedoch innerhalb dieses Magnetfelds parallel, bzw. anti-parallel zu den Magnetfeldlinien aus (vgl. Abb. II). Dabei ist die Orientierung der magnetischen Momente nicht vollkommen parallel zu den Feldlinien, sondern erfolgt unter einem spezifischen Winkel Θ . Die magnetischen Momente rotieren in diesem Winkel kreiselartig um die Achse des Feldstärkevektors des Hauptmagnetfeldes B_0 und damit um die z-Achse. Diese Kreiselbewegung nennt man Präzession (vgl. Abb. III).

Für die weiteren Erläuterungen soll ein rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem zu Hilfe gezogen werden,

dessen z-Achse parallel zum Hauptmagnetfeld liegt (mit steigenden Werten in Richtung des magnetischen Nordpols).

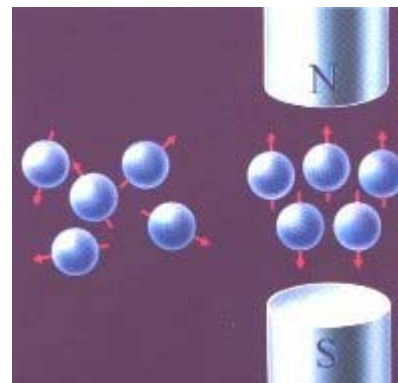


Abb.II: Die magnetischen Momente der Protonen richten sich unter normalen Umständen zufällig im Raum aus und kompensieren sich somit gegenseitig aus (links). Werden sie jedoch in ein äußeres Magnetfeld gebracht (rechts), richten sie sich nach diesem aus (Abb. aus Schild, 1990).

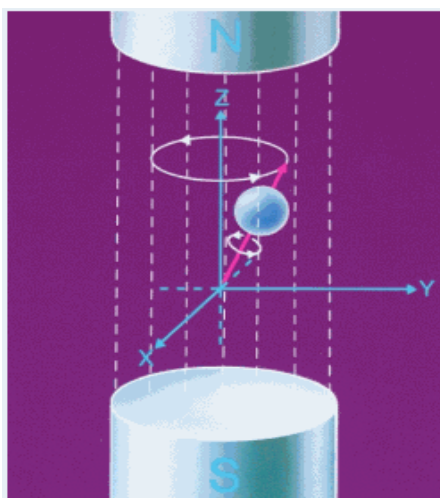


Abb.III: Externer Magnet, in dem sich ein einzelner Wasserstoffkern parallel zum Magnetfeld ausrichtet und um den Vektor B_0 , hier repräsentiert durch die z-Achse, präzessiert, in diesem Falle parallel ausgerichtet: Der Pfeil repräsentiert die Magnetisierung, mit der Spitze als Nordpol (Abb. aus Schild, 1990).

Die Ausrichtung der magnetischen Momente im Magnetfeld kann parallel (energetisch günstiger) oder antiparallel (energetisch ungünstiger) erfolgen, das heißt der Nordpol des Kerns kann nach oben zum Nordpol des Gesamtmagnetfeldes weisen oder genau in die andere Richtung zeigen (vgl. Abb. II). Da die energieärmere Ausrichtung parallel zum Feld stärker besetzt ist, wird die Nettomagnetisierung größer Null, da mehr positive Ladungen in Richtung des Nordpols des Gesamtmagnetfeldes „zeigen“ (parallele Ausrichtung) als in die entgegengesetzte (anti-parallele Ausrichtung). Die so entstandene Magnetisierung wird auch als longitudinale oder Längsmagnetisierung M_z bezeichnet (vgl. Abb. IV, Va). Da diese Magnetisierung M_z aber parallel zur starken Magnetisierung des Außenmagneten steht, ist diese faktisch nicht messbar.

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Hinzu kommt, dass die magnetischen Momente der Wasserstoffkerne zufällig um den Vektor B_0 präzessieren, so dass sich ihre Ladungen parallel zur xy-Ebene gegenseitig zu Null aufheben: Die transversale oder Quer-Magnetisierung M_{xy} ist damit 0.

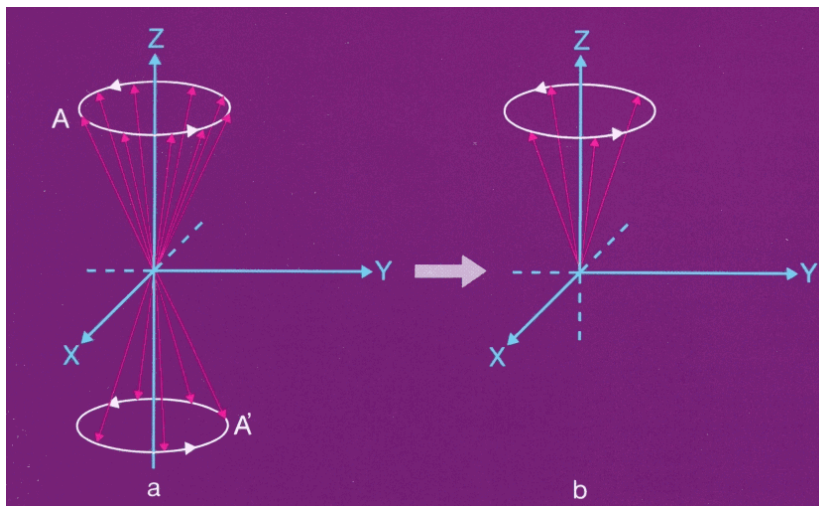


Abb. IV: Unter Annahme eines parallel zur z-Achse verlaufenden Magnetfeldes B_0 heben die magnetischen Momente der fünf anti-parallel ausgerichteten Protonen die gleiche Anzahl an parallelen Momenten auf. Die verbleibenden vier parallelen magnetischen Momente erzeugen die longitudinale Magnetisierung in Richtung der z-Achse (Abb. aus Schild, 1990).

Die Frequenz der Präzession um die z-Achse ist abhängig von der Stärke des Magnetfeldes B_0 , sowie von materialspezifischen Eigenschaften und wird als Larmorfrequenz bezeichnet. Diese errechnet sich anhand der sog. Lamorgleichung:

$$W_0 = \gamma \cdot B_0$$

W_0 = Larmorfrequenz in Hz

γ = materialspezifische gyromagnetische Konstante Hz/ T⁻¹

B_0 = Stärke des externen Magnetfeldes {T} (T=Tesla)

Sendet man nun in dieses präzessierende sog. Spin-Ensemble (die Gesamtheit aller Wasserstoffkerne eines Volumens) einen Hochfrequenzpuls (auch: RF-Puls) hinein (Abb. Vb), der exakt die gleiche Frequenz wie die Larmor-Frequenz hat, so passieren zwei Dinge: Erstens absorbiert das Ensemble die durch den Impuls versendete Energie und einige der Protonen klappen gewissermaßen vom energieärmeren parallel ausgerichteten Zustand in den energiereicheren, anti-parallelen Zustand um (Abb. Vc). Damit nimmt die longitudinale Magnetisierung M_z ab, da sich nun mehr Längsmagnetisierungskomponenten aufheben als zuvor. Zweitens werden die Protonen, bzw. Wasserstoffkerne in Resonanz gebracht, das heißt die Magnetisierungsvektoren der Kerne kreiseln nicht mehr zufällig um die z-Achse, sondern weisen alle gleichzeitig in eine Richtung - sie rotieren in Phase oder auch präzessionssynchron (Abb. Vd).

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

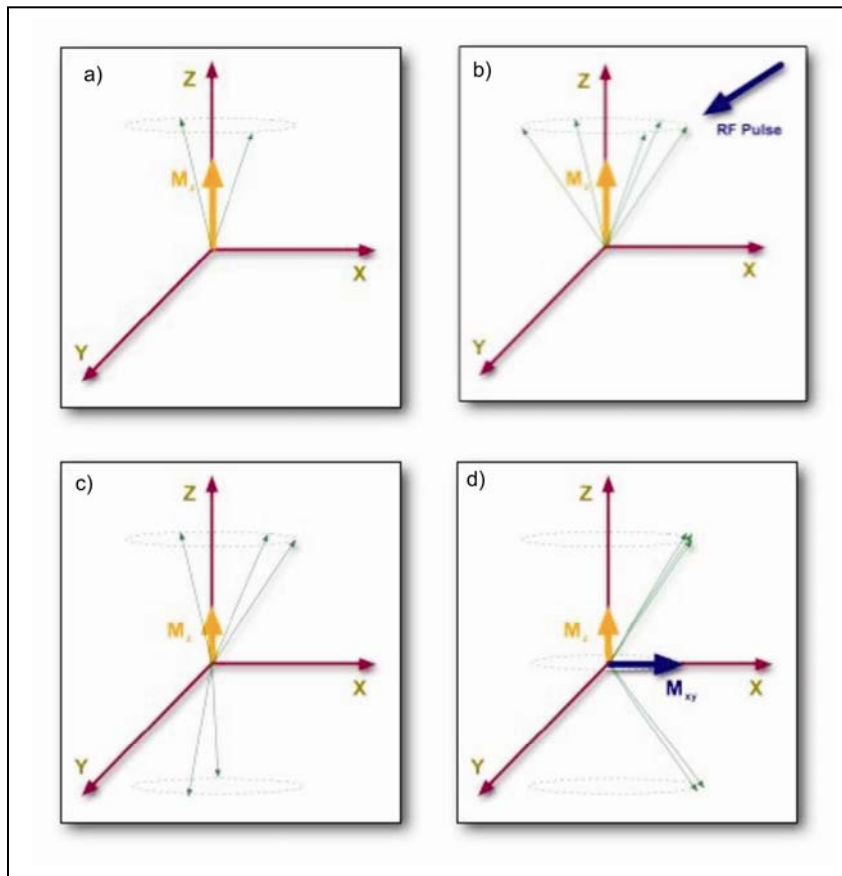


Abb.V: a) Nettomagnetisierung M_z in gelb. b) Einsendung eines Hochfrequenzpulses mit Larmorfrequenz in das Spin-Ensemble. c) Übergang einiger Protonen in die anti-parallele Ausrichtung: longitudinale Magnetisierung M_z (gelb) nimmt ab. d) Phasensynchronisation durch Kernresonanzeffekte \rightarrow Präzession der Protonen ist damit nicht mehr zufällig: transversale Magnetisierung M_{xy} (blau) nimmt zu (in diesem Falle liegt M_{xy} auf der x-Achse, diese Position ändert sich aber durch die Rotation, bzw. Präzession in der xy-Ebene). (Abb. von wikibooks.orgⁱⁱ)

Hoben sich zuvor noch die Einzelmagnetisierungen in der x-y-Ebene auf, weil die Richtung der magnetischen Momente (dargestellt durch Pfeile) zufällig in ihr verteilt waren, addieren sich nun alle transversalen Magnetisierungskomponenten auf. Die Nettomagnetisierung für M_{xy} wird nunmehr größer Null und eine in der xy-Ebene mit Larmorfrequenz rotierende makroskopische Magnetisierungskomponente entsteht, welche als Spannung messbar ist: Dies stellt das MR-Signal dar und wird auch Freier Induktionszerfall (FID: *free induction decay*) genannt (gute Übersichten über die physikalischen Grundlagen des MRI geben Schild, 1990 und Köchli & Marincek, 1998).

ⁱⁱ http://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine/MRI_&_Nuclear_Medicine (aufgerufen am 02.04.08)

Relaxation

Wird der RF-Puls wieder ausgeschaltet, so beginnen die Protonen nach und nach aus ihrem angeregten Zustand wieder in ihren Ausgangszustand zurückzukehren.

Das bedeutet einerseits, dass die Kerne ihre Energie stückweise wieder an das sie umgebende Gewebe abgeben (Spin-Gitter-Wechselwirkung) und größtenteils in den energieärmeren, parallelen Zustand zurückkehren. Dadurch nimmt die longitudinale Magnetisierung M_z wieder zu, weswegen dieser Relaxationsprozess auch als longitudinale Relaxation bezeichnet wird. Die Zeit, die es benötigt, die longitudinale Magnetisierung wieder zu 63 % herzustellen wird mit der Zeitkonstanten T_1 beschrieben.

Gleichzeitig kommt es durch magnetische Wechselwirkungen zwischen den phasensynchronen Protonen (Spin-Spin-Wechselwirkung) zu einer Dephasierung, das heißt die Protonen beginnen langsam wieder zufällig um B_0 zu präzessieren, so dass die transversale Magnetisierung M_{xy} wieder abnimmt. Die Zeit, nach der die transversale Magnetisierung auf 37 % des Wertes direkt nach der Anregung abgesunken ist, wird mit T_2 bezeichnet.

Durch konstante Inhomogenitäten des externen Magnetfeldes B_0 , die entweder durch den Scanner selbst oder den Körper des Pbn verursacht werden können, wird die Dephasierung der Kerne beschleunigt. Das Signal zerfällt deshalb noch schneller als nur aufgrund des oben beschriebenen Mechanismus, dies wird mit einer Zeitkonstanten T_2^* beschrieben.

T_1 - und T_2/T_2^* -Relaxationsprozesse laufen unabhängig voneinander, aber zur gleichen Zeit ab, wobei T_2 deutlich schneller ist als T_1 (s.a. Schild, 1990; Köchli et al., 1998).

Bildgebung

Unterschiedliche Gewebearten besitzen verschiedene T_1 - und T_2/T_2^* -Relaxationszeiten, so dass an einem bestimmten Ort, von dem das MR-Signal empfangen wird, auf die Gewebeart geschlossen werden kann.

Um ein MR-Bild zu erhalten, wird eine Schicht mehrfach hintereinander angeregt (vgl. Abschnitt Ortskodierung). Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anregungen einer Schicht wird Repetitionszeit (TR) genannt. Die TR beeinflusst, wie lange die Kerne Zeit haben sich nach einer Anregung wieder in ihren Ausgangszustand zurück zu begeben, das heißt wie lange sie Zeit haben um wieder in die energetisch günstigere parallele Ausrichtung zurückzuklappen. Je mehr Kerne bereits wieder parallel zu B_0 präzessieren, desto mehr Längsmagnetisierung steht bei erneuter Anregung wieder zur Verfügung, was sich in einem stärkeren Signal manifestiert. Wählt man nun eine kurze TR, so gibt es einen geringen Kontrast zwischen Geweben mit kurzer und Geweben mit langer T_1 -Relaxationszeit. Somit ist nur bei einer gewissen TR überhaupt ein Kontrast zwischen verschiedenen Geweben zu sehen.

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Der Bildkontrast insgesamt hängt davon abgesehen aber vielmehr von der so genannten Echozeit (TE) ab. Diese bestimmt, ob es sich um ein T_1 -gewichtetes oder ein T_2 -gewichtetes MR-Bild handelt. Die TE ist die Zeitspanne zwischen der Anregung der Spins durch den RF-Puls und der Messung des MR-Signals.

Wählt man eine kurze TE handelt es sich um eine so genannte T_1 -Gewichtung. Gewebe mit vergleichsweise kurzer T_1 (zum Beispiel Weiße Substanz) relaxieren rasch und stellen bei erneuter Anregung bereits wieder relativ viel Längsmagnetisierung zur Verfügung. Da das Ausmaß der Längsmagnetisierung direkt das Ausmaß der Quermagnetisierung beeinflusst (diese kann nicht größer als die vorherige Längsmagnetisierung sein), geben nun diese Gewebe ein stärkeres Signal ab und erscheinen im MR-Bild dunkel. Gewebe mit langer T_1 (zum Beispiel Graue Substanz) hatten in diesem Falle noch zu wenig Zeit um zu relaxieren. Ihre Längsmagnetisierung ist nach dieser kurzen Zeit noch nicht wieder besonders hoch, sie geben wenig Signal ab und erscheinen im Bild dunkel. T_1 -Messungen werden in erster Linie für anatomische Aufnahmen benutzt.

Wählt man dagegen eine lange TE, so spielt die vorher vorhandene Längsmagnetisierung nur noch eine geringe Rolle. Entscheidend ist nun nur noch die T_2 -Relaxationszeit, weswegen man bei langer TE auch von T_2 -Gewichtung spricht. Das liegt daran, dass Gewebe mit einer schnellen T_1 - auch eine schnelle T_2 -Zeit aufweisen. Das heißt, dass etwa Weiße Substanz, die schnell wieder Längsmagnetisierung aufbaut, dafür auch schneller im Abbau der Quermagnetisierung ist. Wenn TE nun lang genug ist, so ist die Quermagnetisierung in weißer Substanz bereits nur noch wenig vorhanden, während sie in der langsameren Grauen Substanz noch stärker vorhanden ist, unabhängig davon, wie groß zuvor die Längsmagnetisierung war. Wie oben bereits geschrieben ist die Quermagnetisierung im Prinzip das, was man als MR-Signal messen kann. Nach langer TE geben also plötzlich Gewebe mit langsamer Relaxationszeit das stärkere Signal ab und erschienen somit im MR-Bild als hell.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Gewebe mit kurzer Relaxationszeit bei T_1 -Gewichtung von MR-Bildern hell erscheint, bei T_2 -Gewichtung aber dunkel (s.a. Schild, 1990; Köchli et al., 1998).

Ortskodierung

Um letztendlich sagen zu können, woher ein Signal kommt, das heißt aus welchem Hirnvolumenabschnitt, muss das Signal lokalisiert werden. Dies wird mittels der so genannten Ortskodierung realisiert. Die grundlegende Idee zur Ortskodierung stammte von Lauterbur (1973) und beruht darauf, dass die Präzessionsfrequenz des Kernspins linear mit der Stärke des Magnetfeldes B_0 zusammenhängt (s. o. Larmorgleichung). Wenn nun die Stärke des Magnetfeldes nicht an allen Orten gleich ist, so ist folglich auch die Frequenz der Spins unterschiedlich.

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Durch eine Frequenzanalyse (Fourier-Transformation) der empfangenen Signale ist es dann möglich, die einzelnen Signalanteile ihren Entstehungsorten zuzuordnen.

Für die selektive Wahl einer bestimmten Schicht des menschlichen Körpers etwa wird das permanente Hauptmagnetfeld durch ein zusätzliches, temporäres Gradienten-Magnetfeld überlagert. Die Stärke des resultierenden Magnetfelds steigt dann (in der Regel linear) in Richtung des Gradienten an. Dadurch ist es möglich die Präzessionsfrequenzen der Kerne in allen drei Raumrichtungen gezielt zu beeinflussen.

Diese Gradienten werden in der Regel nacheinander angewandt. Der erste Gradient dient der Sensitivierung einer ausgewählten Schicht für den Anregungs-RF-Puls (Schichtselektionsgradient). Jede Schicht hat nach dem Anlegen dieses Gradienten ihre eigene Präzessionsfrequenz und kann somit auch nur mit einem spezifischen RF-Puls angeregt werden, alle anderen, nicht interessierenden Schichten bleiben von diesem unbeeinflusst. Innerhalb dieser Schicht ist es jedoch weiterhin unmöglich die Quelle eines bestimmten Signal zu lokalisieren. Deshalb werden im Folgenden zwei weitere Ortskodierungsschritte angewandt: Phasen- und Frequenzkodierung. Für diese werden ebenfalls unterschiedliche Gradienten geschaltet.

Zur *Phasenkodierung* (vgl. Abb. VII) wird nach der selektiven Anregung in z-Richtung (s.o.) ein Gradient in y-Richtung geschaltet. Dieser bewirkt, dass die Lamorfrequenzen in der betreffenden Schicht auch nicht überall gleich, sondern in y-Richtung abnehmend sind, was wiederum eine lokale Variation der Präzessionsfrequenzen bewirkt: Da das Spinensemble durch die vorhergehende Schichtwahl bereits angeregt ist und phasensynchron in der xy-Ebene präzessiert, wird durch diese Manipulation nun eine ortsabhängige Beschleunigung bzw. Verzögerung der

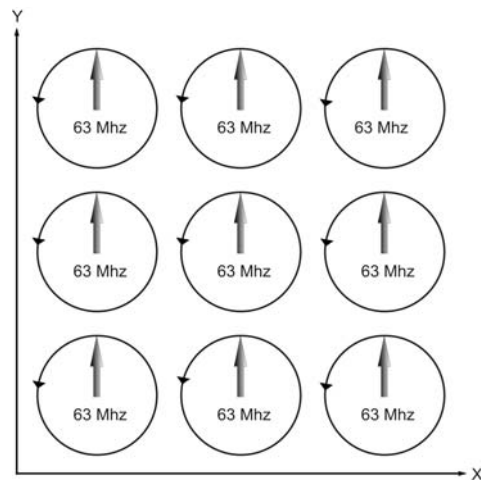


Abb. VI: Nach der Schichtwahl in z -Richtung sind alle Spins einer spezifischen Schicht in Phase (Phasenrichtung in xy -Ebene durch graue Pfeile dargestellt) und rotieren mit der gleichen Lamorfrequenz (hier: 63 MHz).

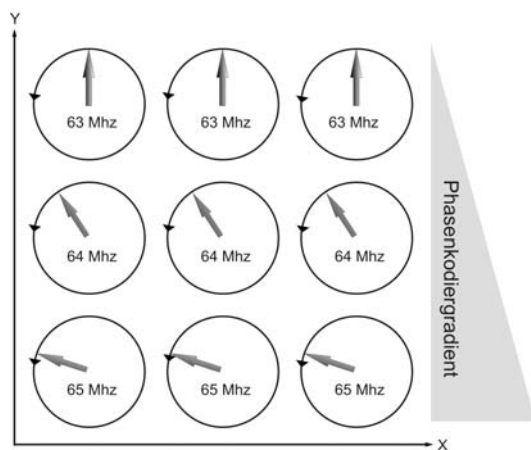


Abb. VII: Phasenkodierung: Ein magnetischer Gradient in y -Richtung bewirkt eine Änderung der Präzessionsgeschwindigkeit, das heißt die Spins in der unteren Zeile der Abbildung präzessieren schneller, was eine zeilenspezifische Phasenverschiebung zur Folge hat. Nach Ausschalten des Gradienten präzessieren wieder alle Spins mit der gleichen Geschwindigkeit, behalten aber die Phasenverschiebung bei.

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Präzessionsfrequenz in einer Raumrichtung bewirkt. Das Ergebnis ist eine zeilenspezifische Phasenverschiebung: Je höher die Frequenz eines Spins, desto größer gewissermaßen sein Phasenvorsprung. (vgl. Abb.VII). Wird der Gradient wieder ausgeschaltet, präzessieren alle Kerne mit gleicher Geschwindigkeit weiter, wobei diese Phasenverschiebung, das heißt der Vorsprung einiger Spins gegenüber anderen beibehalten wird. So kann nun jede Zeile innerhalb einer Schicht anhand ihrer nun für sie typischen Phase identifiziert werden.

Die bisher geschalteten Gradienten in y- und z-Richtung erlauben die Aufschlüsselung in zwei Raumebenen. Die Aufschlüsselung in der verbleibenden x-Richtung wird durch die sog. *Frequenzkodierung* erreicht. Zur Frequenzkodierung wird ein dritter, der Frequenzkodiergradient geschaltet. Dieser bewirkt, dass das Magnetfeld in x-Richtung ansteigend ist.

Die Larmorfrequenzen verhalten sich nun wieder wie oben beschrieben: Sie nehmen in x-Richtung zu. Im MR-Signal sind somit mehrere Frequenzen enthalten, man erhält gewissermaßen ein ganzes Frequenzspektrum (vgl. Abb.VIII). Da während des Anliegens des Frequenzkodiergradienten das MR-Signal gemessen wird, kann jede spezifische Frequenz und Phase innerhalb dieses Spektrums eindeutig dem Raumpunkt zugewiesen werden, in dem sie ihren Ursprung hat. Dies geschieht anhand einer diskreten Frequenzanalyse, der sog. Fast Fourier-Transformation (FFT). Die Signalintensität (Grauwert im Bild) an der Stelle xyz entspricht dabei der für diese Frequenz und Phase im Spektrum enthaltenen Energie (spektrale Dichte). Die so entstehende Bildmatrix mit m Spalten und n Zeilen (mxn, in der Abbildung 3x3) besteht aus einzelnen Volumenelementen, den sog. Voxeln.

Diese Bildmatrix, in der jedem Voxel eine eindeutige Frequenz und Phase zugeordnet werden kann, wird mathematisch als sogenannter K-Raum aufgefasst. In der einen Richtung (im Beispiel in y-Richtung) unterscheiden sich die Phasen in definierter Weise, in der anderen Richtung (x-Richtung) die Frequenzen. Das MR-Signal, das gewissermaßen ein Summensignal darstellt, kann nun anhand der gegebenen Information aufgeschlüsselt werden und jedem Voxel eine bestimmte Signalintensität zugeordnet werden. (s.a. Schild, 1990; Köchli et al., 1998).

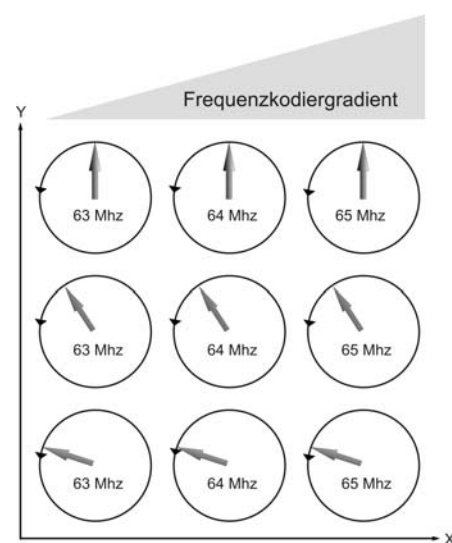


Abb.VIII: Frequenzkodierung: Ein magnetischer Gradient wird in x-Richtung geschaltet. Es kommt zum Anstieg der Präzessionsfrequenz von links nach rechts. Der Gradient bleibt während des Signalempfangs eingeschaltet, so dass die Signale einer Zeile je eine unterschiedliche Frequenz haben.

Prinzipien der funktionellen Magnetresonanztomographie

Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI) hat die Darstellung neuronaler Aktivierungen im Gehirn zum Ziel. Das fMRI kann diese Hirnaktivität aber nicht direkt messen, da sie anders als zum Beispiel beim EEG, das direkt die Hirnströme messen kann, mit den oben beschriebenen Bildgebungsmechanismen nicht darstellbar ist. Streng genommen misst man mit fMRI gar keine neuronale sondern physiologische Aktivität, die mit neuronaler Aktivität *korreliert* ist. Bereits im 19. Jahrhundert konnte zum Beispiel von Broca gezeigt werden, dass neuronale Aktivität mit einer lokalen Erweiterung der Blutgefäße einhergeht. Diese so genannte hämodynamische Antwort hängt von dem durch die neuronale Aktivität verursachten Anstieg im lokalen Sauerstoffmetabolismus ab und beeinflusst die venöse Sauerstoffkonzentration, den Blutfluss und das Blutvolumen (Nair, 2005). Dieser mit dem MR-Tomographen messbare Effekt wird als BOLDⁱⁱⁱ-Effekt (*Blood Oxygenation Level Dependent*) bezeichnet (Ogawa, Lee, Nayak, & Glynn, 1990). Das BOLD-Signal ist eine Veränderung der MR-Signalintensität aufgrund einer Veränderung des Flusses sauerstoffreichen Blutes. Es ist somit die Konsequenz einer ganzen Serie indirekter Effekte. Um den Zusammenhang zwischen neuronaler Aktivität und dem MR-Signal besser verstehen zu können, muss man den Zusammenhang von neuronaler Aktivität, der dafür benötigten Energie, dem Sauerstoffverbrauch und dem damit einhergehenden veränderten Blutfluss näher betrachten. Darum wird im folgenden Abschnitt die physiologische Grundlage der BOLD-Antwort näher erläutert und anschließend, was genau nun eigentlich mittels fMRI gemessen wird.

Physiologische Grundlagen der BOLD-Antwort

Die neurophysiologische Signalübertragung funktioniert *zwischen* Neuronen mittels Neurotransmittern und *innerhalb* eines Neurons, bzw. entlang seines Axons, mittels Veränderungen des Membranpotentials, bzw. der ionischen Gradienten.

Letzteres soll kurz erläutert werden: Neurone haben eine semipermeable Membran aus einer Lipiddoppelschicht, die das Innere vom Äußeren trennt. Diese Membran ist undurchlässig für geladene Teilchen, das heißt Ionen, weswegen ein vorhandenes Ungleichgewicht der Ionenverteilung von Na⁺-Ionen und K⁺-Ionen aufrechterhalten werden kann: Im Inneren des Neurons befinden sich mehr K⁺-Ionen, außen mehr Na⁺-Ionen. Wäre die Membran permeabel, so würden die Ionen dem sog. osmotischen Druck nachgeben und hindurch diffundieren und damit führte es zu einer Gleichverteilung der Ionen führen. Da das im physiologischen Zustand nicht der Fall ist, wird die Ladungstrennung aufrechterhalten und bewirkt eine Spannung zwischen Intra- und Extrazellulärraum, das Ruhepotential. In der Membran gibt es jedoch

ⁱⁱⁱ deutsch: vom Sauerstoffgehalt im Blut abhängiger Effekt

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Ionenkanäle, durch die die Ionen frei diffundieren können, diese sind im Ruhezustand jedoch geschlossen. Wenn Neurotransmitter, in der Regel Glutamat, von einem anderen Neuron ausgeschüttet werden und über den synaptischen Spalt an einen Rezeptor an diesen Ionenkanälen binden, so öffnen sich diese und die Ionen folgen sofort dem osmotischen Druck um ein Konzentrationsgleichgewicht zu erreichen: Es kommt zu einer Abnahme des elektrischen Potenzials und damit zu einer lokalen Depolarisierung. Dies stellt das exzitatorische postsynaptische Potential (EPSP) dar. Ab einem bestimmten Schwellenwert entwickelt sich aus einer Reihe solcher EPSPs ein Aktionspotential, das eine Kettenreaktion entlang des Axons auslöst: jeweils an der benachbarten Stelle werden wiederum spannungsinduziert Ionenkanäle geöffnet und das Aktionspotential wird dadurch bis hinunter zum Zielneuron weitergeleitet.

Um nun aber wieder in den Ruhezustand, das heißt zu einer asymmetrischen Ionenverteilung zurückkehren zu können, muss Energie aufgewendet werden, denn die Rückführung der Ionen in das Ruhe-Ungleichgewicht muss durch aktives Zurückpumpen entgegen des osmotischen Drucks realisiert werden. Dies geschieht mit Hilfe von Ionenpumpen, die für diesen Prozess Energie konsumieren, die durch Aufspaltung von Adenosintriphosphat (ATP) in Adenosindiphosphat (ADP) gewonnen wird. Dieses muss nachproduziert werden, da nicht genug lokale Energiereserven im ZNS vorhanden sind. Hauptsächlich wird ATP aus Glukose gebildet. Dies kann aerob oder anaerob geschehen, wobei die aerobe, das heißt sauerstoffbenötigende Generierung um ein vielfaches effektiver, wenn auch etwas langsamer ist als die anaerobe. Die aerobe Bildung von ATP läuft grob gesagt über drei Schritte ab: Zunächst werden über die Glykolyse in mehreren Zwischenschritten aus der Glukose Pyruvate gebildet. Diese werden in den Zitronensäurezyklus eingespeist, der wiederum Sauerstoff benötigt. Die an diesen anschließende Atmungskette in den Mitochondrien der Zelle erzeugt Energie, mit der das Enzym ATP-Synthase 34 ATP-Moleküle schafft, das heißt aus einem Glukosemolekül werden aerob 34 ATP-Moleküle erzeugt. Die anaerobe Generierung, das heißt der Einzelschritt der Glykolyse erzeugt dagegen nur zwei ATP-Moleküle. Sie ist aber soviel schneller, dass es sich bei solch schnell ablaufenden Prozessen wie bei der neuronalen Verarbeitung auch sinnvoll sein kann, diesen unökonomischeren Weg zu nehmen.

Zur effektiven Herstellung von ATP werden also Glukose und Sauerstoff benötigt. Beides wird über das vaskuläre System, das heißt über das Blut antransportiert. Es erfolgt eine Aufnahme von Glukose und Sauerstoff und eine Abgabe des Abfallprodukts CO_2 an das Hämoglobin, welches das Transportmolekül im Blut darstellt und dessen rote Farbe erzeugt. Ein an Sauerstoff gebundenes Hämoglobinmolekül wird als Oxyhämoglobin bezeichnet, ein an das Abfallprodukt CO_2 gebundene als Desoxyhämoglobin.

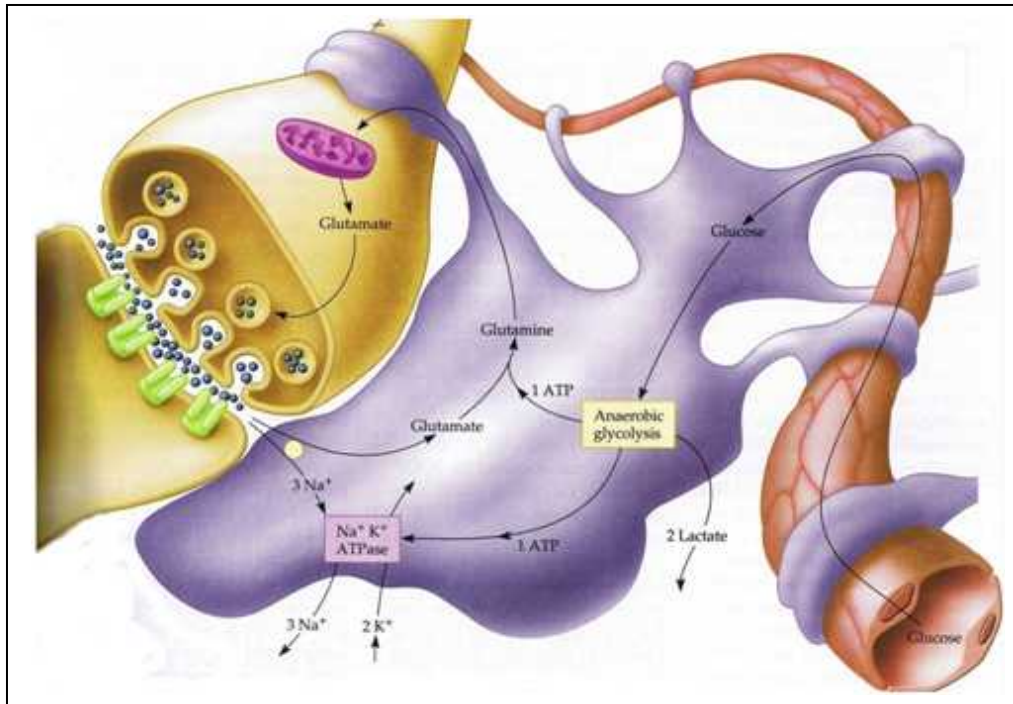


Abb.IX: Möglicher Mechanismus der neuro-vaskulären Kopplung in Astrozyten (Abbildung aus Huettel, Song, & McCarthy, 2004)

Um nun die nötige Energie für die Wiederherstellung des Ruhepotentials zu erzeugen, braucht es vor allem vermehrt Glukose, welche nur über den Blutkreislauf an Stellen neuronaler Aktivität transportiert werden kann. Da der Blutfluss proportional zum Durchmesser der Blutgefäße ist, müssen diese erweitert werden, um einen erhöhten Blutfluss zu erzeugen. Vermutlich sorgen aktive Neurone oder die Gliazellen (insbesondere Astrozyten) in deren Umgebung für die Ausschüttung sog. vasoaktiver Substanzen wie zum Beispiel Stickstoffmonoxid (NO), die dazu führen, dass die Arterien dilatieren (vgl. dazu Abb. IX).

Die Vorstellung, dass neuronale Aktivität zeitlich und räumlich von einer vaskulären Antwort begleitet wird, wird unter dem Begriff der neuro-vaskulären Kopplung zusammengefasst. Dass es eine solche Kopplung gibt, ist unstrittig, wie stark aber zum Beispiel der metabolische Bedarf der Nervenzelle bei Stimulation tatsächlich ansteigt, was genau die Regelgröße darstellt (Sauerstoff, Glukose oder auch Laktat als Abfallprodukt der Glykolyse), welche Mediatoren die Kopplung genau steuern oder wie die Latenz der vaskulären Antwort zu erklären ist, darüber gibt es bisher keine klaren Antworten. Für die Methode des fMRI ist es aber primär wichtig zu wissen, dass es einen solchen Zusammenhang gibt (Überblicke über die physiologischen Grundlagen des fMRI geben Huettel et al., 2004 und Nair, 2005).

BOLD-Antwort und MR-Signal

Für die funktionelle Bildgebung macht man sich die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von sauerstoffreichem und sauerstoffarmem Blut zunutze, für die das an

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Hämoglobin gebundene Eisen verantwortlich ist. Desoxyhämoglobin ist im Gegensatz zum diamagnetischen Oxyhämoglobin paramagnetisch, das heißt durch zwei ungepaarte Eisenelektronen kann das Eisen seine volle magnetische Wirkung entfalten. Eine hohe lokale Konzentration an paramagnetischem Desoxyhämoglobin führt zu einem inhomogenen lokalen Magnetfeld, was wiederum den Zerfall der Quermagnetisierung, bzw. transversalen Magnetisierung nach Anregung der Spins beschleunigt. Dadurch verkürzt sich die T_2^* -Relaxationszeit. Andersherum führt eine Verminderung des Desoxyhämoglobins zu einer Verlangsamung von T_2^* .

Neuronale Aktivierung müsste aufgrund des Verbrauchs von Sauerstoff zu einer lokalen Zunahme des Desoxyhämoglobins führen. Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Dies liegt daran, dass es lokal zu einer vaskulären Überkompensation kommt und durch den dramatischen Anstieg des Blutflusses mehr Sauerstoff angeliefert wird, als tatsächlich benötigt und metabolisiert wird. Es steigt damit der Anteil an Oxyhämoglobin. Da der relative Anteil von Oxyhämoglobin am Gesamtblutvolumen bei neuronaler Aktivierung also zunimmt, verlängert sich die T_2^* -Zeit, da die Dephasierung der Kerne langsamer erfolgt. Demnach ist in den neuronal aktivierten Arealen ein Anstieg des MR-Signals messbar: die BOLD-Antwort.

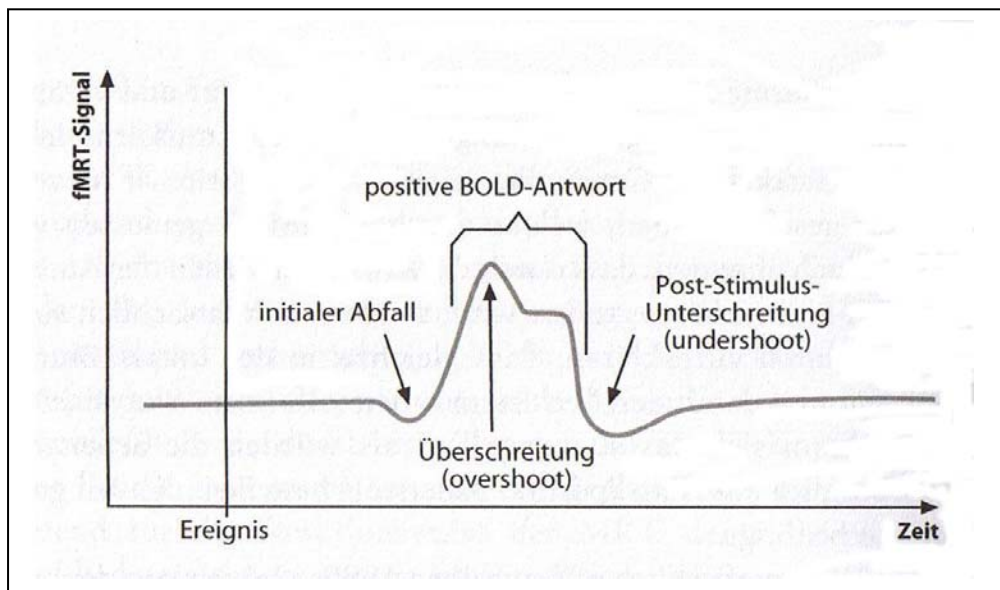


Abb.X: Typischer zeitlicher Verlauf der BOLD-Antwort (Abbildung aus Schleim, 2008)

Die BOLD-Antwort hat einen typischen zeitlichen Verlauf (vgl. Abb.X). Es kommt zunächst kurzfristig erst einmal zu einer Abnahme des sauerstoffreichen Blutes bis Nachschub kommt. Dieser *initial dip* ist durch eine kurzfristige Signalabnahme gekennzeichnet. Das liegt höchstwahrscheinlich an der Verzögerung der Anlieferung sauerstoffreichen Blutes, so dass es zunächst zu einer Zunahme sauerstoffarmen Blutes und damit zu einer Signalabnahme kommt. Die eigentliche BOLD-Antwort und die damit einhergehende Signalzunahme erreicht ihr

Maximum erst nach etwa 4-6 Sekunden und wird danach von einem bis zu 30 Sekunden dauernden so genannten *undershoot* gefolgt.

Statistische Verarbeitung von funktionellen Aktivierungsdaten

Bevor die eigentlichen funktionellen Daten analysiert werden können, müssen sie zunächst vorverarbeitet werden. In dieser Arbeit erfolgte die Auswertung der anatomischen und funktionellen Daten mittels SPM Version 5.0^{iv}. Zur Beseitigung von Artefakten in den Daten, wie etwa die Bewegungen der Pbn, erfolgte zunächst eine mehrstufige Vorverarbeitung (*preprocessing*, vgl. Abb. XI).

Die wichtigsten Schritte des *Preprocessings* bestehen aus der Bewegungskorrektur (*Realignment*), der Normalisierung und der räumlichen Glättung (*Smoothing*).

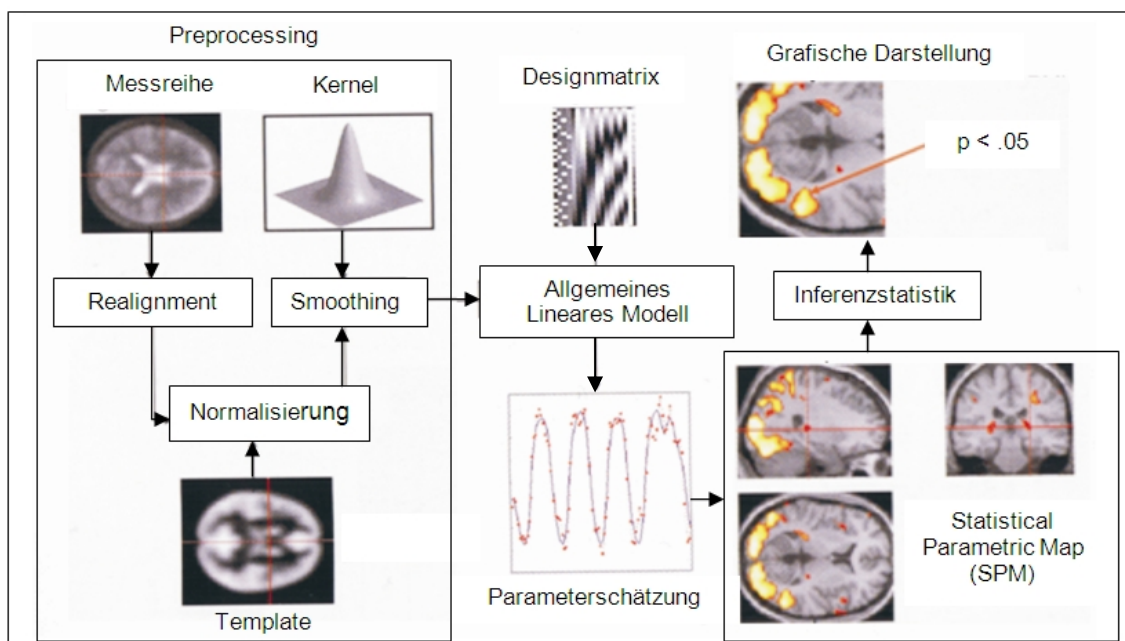


Abb.XI: Darstellung der einzelnen Verarbeitungsschritte der fMRI-Daten (Abb. nach Friston, Ashburner, Kiebel, Nichols, & Penny, 2007, S. 312 nebenstehend, einzelne Veränderungen durch die Autorin)

Durch bereits geringe Bewegungen eines Pbn kann es zu starken Artefakten in den funktionellen Daten kommen, da diese auf ein einzelnes Bild referiert werden, das zu Beginn der Messung aufgenommen wurde. Eine Bewegung während der funktionellen Messungen führt dann zu Fehlern in der Referenzbildung, denn ein Voxel, der in dieser Studie eine Größe von gerademal 16 mm^3 aufweist, repräsentiert in den Messdaten einen fest definierten Punkt im räumlichen Koordinatensystem innerhalb des Tomographen. Eine auch nur leichte Bewegung des Kopfes kann dazu führen, dass zwar für diesen physikalisch festen Punkt weiterhin ein Signal aufgezeichnet wird, dieses nun aber womöglich ganz andere Neurone im

^{iv} Statistical Parametric Mapping: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Gehirn des Pbn repräsentiert. Dies kann zu einer Vergrößerung der Wahrscheinlichkeit für falsch positive und falsch negative Befunde bei der statistischen Auswertung führen: Kortexareale, welche nicht aktiv sind, werden dann irrtümlich als aktiv angenommen und umgekehrt. Gerade in der vorliegenden Studie, in der die Pbn eine Bewegung des Joysticks ausführen mussten ist mit großen Bewegungsartefakten zu rechnen.

Darum wird zunächst die Bewegungskorrektur vorgenommen. Das erste funktionelle Bild wird dabei als Referenzbild verwendet. Man macht sich dabei prinzipiell zunutze, dass sich nicht einzelne Voxel im Raum bewegen, sondern immer das Gehirn als Ganzes. Darum lassen sich gut mathematische Algorithmen anwenden, um die Änderungen in der Raumlage (drei mögliche Translationen, sowie drei mögliche Rotationen auf allen drei Raumachsen) wieder auf das Referenzbild rückrechnen, gewissermaßen rechnerisch rückgängig machen. Die durch die Bewegungen des Kopfes der Pbn verursachten unterschiedlichen Artefakte der MR-Bilder werden auf diese Weise eliminiert beziehungsweise minimiert. In einigen Fällen sind die Bewegungen jedoch zu stark. Diese Daten müssen aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

Im nächsten Schritt wird die Normalisierung vorgenommen. Die Anatomie des Gehirns variiert von Mensch zu Mensch, ähnlich wie ein Fingerabdruck. Durch diesen Schritt der Vorverarbeitung wird das Hirn an einen standardisierten Raum angepasst. Dazu kann die mit SPM 5 mitgelieferte Vorlage (*Template*) eines T1-Bildes genutzt werden. Diese Vorlage basiert auf dem so genannten MNI-Standardgehirn, das stereotaktisch anhand von 152 Einzelgehirnen erstellt wurde. Als Koordinatensystem wird darin das Talairach-Koordinatensystem (Talairach & Tournoux, 1988) genutzt. Anhand der zwei „Landmarken“ des Talairachraumes, der anterioren und posterioren Kommissur, wird das individuelle Gehirn auf die Vorlage angeglichen. Dies geschieht durch Minimierung der Abstandskvadrat beider Gehirne (des *Templates* und des Einzelgehirns). Somit liegen anschließend zumindest annähernd die gleichen anatomischen Strukturen jedes Pbn immer an denselben Koordinaten. Dadurch wird der Vergleich der jeweils aktivierten neuronalen Areale zwischen den einzelnen Teilnehmern ermöglicht. Im Rahmen der Normalisierung ist es notwendig, aus den quaderförmigen Voxeln quadratische Voxel zu machen.

Als letzter Schritt der Vorverarbeitung erfolgte die räumliche Glättung der Daten (*Smoothing*). Statistisch irrelevante Signalsprünge der Daten werden dabei heraus gerechnet. Im Prinzip geht man von folgenden Annahmen aus: Es ist statistisch unwahrscheinlich, dass in einem bestimmten Voxel eine sehr starke Aktivierung vorliegt, während sein direkter Nachbar gar keine Aktivierung aufweist. Man kann dann davon ausgehen, dass der Signalausschlag durch Messfehler zustande gekommen ist und versuchen diesen durch Mittelung mit den

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Signalausschlägen seiner Nachbarvoxeln herauszurechnen. Die Festlegung der Bewertung der Nachbarschaft erfolgt dabei in der Regel durch eine Filtermaske, einen so genannten Kernel. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird auf diese Weise deutlich verbessert.

Nach dem Abschluss der Vorverarbeitung werden die Daten üblicherweise der eigentlichen statistischen Analyse unterzogen (vgl. noch einmal Abb. XI). Ziel dieser Analyse ist es, Areale zu finden, in denen die neuronale Aktivität während Stimulation höher ist als in der Ruhebedingung (*Baseline*). Die weitere Analyse lässt sich in folgende Teilschritte untergliedern: Erstellung des statistischen Modells, dessen statistische Überprüfung, sowie die grafische Darstellung der Ergebnisse.

Grundlegend für die Erstellung des statistischen Modells ist das Allgemeine Lineare Modell (ALM): Das MR-Signal wird hierbei als Linearkombination aus gewichteten Designparametern und Fehlern (Signalrauschen) dargestellt. Die Gewichte dieser Linearkombination oder auch Prädiktoren (β -Gewichte) sind die zu schätzenden Parameter. Diese müssen so geschätzt werden, dass die Residuen möglichst gering sind.

Das Modell wird in SPM 5 in einer Designmatrix spezifiziert. Jede Spalte dieser Designmatrix entspricht einer Bedingung des Experimentes und jede Zeile einem Scan.

Um das zu erwartende MR-Signal möglichst genau zu modellieren, wird zur Kodierung der experimentellen Bedingungen eine Kombination aus einer Funktion, die den experimentellen Bedingungen entspricht und einer hämodynamischen Antwort genutzt. Am Ende sollte das aufgestellte Modell eine möglichst genaue Beschreibung des hypothetischen Signalverlaufs für jedes einzelne Voxel erlauben, der während des Experimentes angenommen und nun überprüft wird. Aus dieser Schätzung gehen die β -Bilder oder Statistisch-Parametrischen Karten (*Statistical Parametric Maps*, SPMs) hervor. Sie werden durch die vorhergesagten Parameter der Voxelzeitreihe in unterschiedlichen Graustufen dargestellt.

Nachdem die β -Gewichte geschätzt wurden, können die entsprechenden Hypothesen überprüft werden. Dazu erfolgt der inferenzstatistische Vergleich der jeweiligen β -Gewichte der einzelnen Experimentalbedingungen. Dadurch kann für jedes Voxel festgestellt werden, in welcher Bedingung es zu einer stimulationskorrelierten Zunahme im MR-Signal kam. So kann ermittelt werden, ob und während welcher Bedingung eine Signalintensitätszunahme im Vergleich zur Ruhebedingung oder auch Kontrollbedingung vorlag. Diese Vergleiche werden auch statistische Kontraste genannt. Unter zusätzlicher Beachtung des Restfehlers kann somit die Signifikanz bestimmter Effekte und deren Zuverlässigkeit für den einzelnen Pbn und innerhalb der Gesamtstichprobe beurteilt werden.

Anhang I: Prinzipien der MRI und der fMRI

Dabei unterscheidet man bei der statistischen Analyse zwischen einer First-Level-Analyse, bei der die Aktivierungen eines Einzelprobanden untersucht werden und einer Second-Level-Analyse, bei der Gruppenvergleiche gerechnet werden können.

Literatur

Bloch, F. (1946). Nuclear Induction. *Physical Review*, 70, 460.

Friston, K. J., Ashburner, J. T., Kiebel, S. J., Nichols, T. E., & Penny, W. D. (2007). *Statistical Parametric Mapping. The Analysis of Functional Brain Images*. London: Academic Press.

Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional Magnetic Resonance Imaging*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc.

Köchli, V. D. & Marincek, B. (1998). *Wie funktioniert MRI? (2.Auflage)* Berlin: Springer.

Lauterbur, P. C. (1973). Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature*, 242, 190-191.

Mansfield, P. & Maudsley, A. A. (1976). Line scan proton spin imaging in biological structures by NMR. *Physics in Medicine and Biology*, 21, 847-852.

Nair, D. G. (2005). About being BOLD. *Brain Research Reviews*, 50, 229-243.

Ogawa, S., Lee, T. M., Nayak, A. S., & Glynn, P. (1990). Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance Medicine*, 14, 68-78.

Purcell, E. M., Torrey, H. C., & Pound, R. V. (1946). Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid. *Physical Review*, 69, 37.

Schild, H. H. (1990). *MRI made easy (...well almost)*. Schering AG.

Schleim, S. (2008). *Gedankenlesen – Pionierarbeit der Hirnforschung*. Hannover: Heise Verlag.

Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme.

Anhang J: Tab. der aktivierten anat. Strukt. Nav. vs Baseline über alle 22 Pbn

Tab.I: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen Baseline in Studie 2 über alle 22 Pbn. FWE-korrigiert $p=.05$, extent threshold: 10 Voxel. Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahrscheinlichkeit*	T-Wert (df=60)	Koordinaten MNI (mm)		
					x	y	z
8577	Cerebellum	R		16.04	24	-46	-22
	Vermis			9.09	-5	-59	8
	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 100% (80-100%)	15.31	14	-83	3
	Gyrus calcarinus	L	Area 17: 80% (70-90%)	13.71	-5	-89	-5
	Gyrus lingualis	R	Area 18: 80% (70-90%)	15.08	8	-78	-3
	Gyrus lingualis	R	Area 17: 30% (0-40%)	11.30	27	-57	-3
	Gyrus lingualis	L	Area 18: 30% (20-40%)	14.75	-11	-81	-13
	Gyrus lingualis	L	Area 17: 90% (80-90%)	14.63	-3	-78	0
	Gyrus occipitalis medius	R		14.16	30	-81	30
	Gyrus occipitalis medius	R	hOC5: 10% (10-10%)	9.00	43	-73	11
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 10% (0-10%)	12.38	-27	-84	22
	Gyrus occipitalis medius	L	hOC5: 30% (20-30%)	10.39	-40	-73	14
	Gyrus occipitalis superior	R		12.31	22	-70	46
	Gyrus occipitalis superior	L		13.1	-22	-81	24
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 18: 40% (10-60%)	12.15	-16	-94	22
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 17: 10% (10-10%)	11.85	-22	-92	22
	Gyrus occipitalis inferior	L		5.86	-40	-78	-3
	Cuneus	R	Area 18: 60% (50-70%)	12.79	14	-89	22
	Präcuneus	R		10.87	11	-62	65
	Präcuneus	R	hIP1: 10% (0-10%)	9.97	22	-57	27
	Präcuneus	R	Area 3a: 50% (40-50%)	9.58	8	-46	62
	Präcuneus	R	Area 3b: 20% (10-30%)	9.51	11	-49	65
	Präcuneus	L		8.66	-5	-57	70
	Lobulus parietalis superior	R	Area 2: 20%	11.68	19	-51	68
	Lobulus parietalis superior	L	Area 2: 10% (0-10%)	10.83	-19	-51	68
	Lobulus parietalis superior	L	Area 1: 30% (20-50%)	10.67	-24	-46	68
	Lobulus parietalis superior	L		8.58	-16	-62	59
	Lobulus parietalis inferior	L	Area 2: 100% (80-100%)	6.87	-49	-24	41
	Anteriorer intraparietaler Sulcus	L	hIP1: 10% (0-10%)	6.71	-22	-57	27
	Gyrus frontalis superior	R	Area 6 (SMA): 60% (30-60%)	6.21	8	8	59
	Gyrus frontalis superior	L	Area 6: 40% (30-40%)	13.3	-24	-3	62
Gyrus frontalis superior	L	Area 6 (SMA): 70% (70-90%)	9.65	-5	-5	62	
Gyrus präcentralis	R	Area 4p: 40% (30-80%)	7.74	32	-27	54	

Anhang J: Tab. der aktivierten anat. Strukt. Nav. vs Baseline über alle 22 Pbn

	Gyrus präcentralis	L	Area 4a: 40 % (20-50%)	12.58	-35	-27	59
	Gyrus präcentralis	L	Area 6: 60% (40-90%)	12.20	-38	-19	59
	Gyrus postcentralis	R	Area 2: 20% (10-30%)	10.12	16	-49	70
	Gyrus postcentralis	R	Area 1: 80% (40-90%)	8.96	32	-40	65
	Gyrus postcentralis	L	Area 1: 90% (0-90%)	9.7	-54	-22	54
	Gyrus postcentralis	L	Area 3a: 50% (20-60%)	7.89	-35	-30	46
	Lobulus paracentralis	R	Area 3a: 60% (30-80%)	7.96	14	-35	57
	Gyrus fusiformis	L	Area 18: 10% (10-20%)	11.85	-22	-81	-11
	Gyrus fusiformis	L		8.58	-35	-76	-16
	Gyrus temporalis medius	R	hOC5: 20% (20-40%)	8.58	46	-70	0
	Gyrus temporalis inferior	R	hOC5: 20% (10-20%)	6.19	43	-67	8
	Mittleres Cingulum	L	Area 3a: 30% (20-40%)	6.23	-11	-35	54
242	Gyrus frontalis superior	R	Area 6: 50% (30-50%)	9.72	19	-5	65
	Gyrus frontalis medius	R	Area 6: 20% (20-40%)	6.41	38	-3	57
54	Thalamus	L		8.34	-13	-19	14
47	Mittleres Cingulum	R	Area 6: 40% (20-50%)	7.67	11	-16	49
27	Rolandisches Operculum	L	OP1: 50% (50-70%)	7.64	-46	-27	22
27	Thalamus	R		6.8	22	-27	8
16	Putamen	L		6.74	-24	3	14
11	Gyrus postcentralis	R	Area 1: 80% (50-90%)	6.1	51	-24	51
11	Gyrus präcentralis	L	Area 6: 30% (20-40%)	6.18	-54	8	43

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang K: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Kontrolle über alle 22 Pbn

Tab.II: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen D5 (Kontrollbedingung = Laufen auf dem Strich) in Studie 2 über alle 22 Pbn. $p=.01$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitek-tonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=60)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
402	Posteriores Cingulum	R		4.51	8	-40	24	
	Mittleres Cingulum	R		3.42	16	-46	35	
	Präcuneus	R		3.55	11	-57	38	
	Präcuneus	L		3.87	-8	-62	35	
286	Gyrus lingualis	L	Area 17: 40 % (30–70 %)	5.76	-13	-89	-3	
	Gyrus lingualis	L	Area 18: 40% (30-50%)	2.86	-11	-84	-13	
	Gyrus occipitalis inferior	L		4.66	-32	-84	-11	
	Gyrus occipitalis inferior	L	Area 17: 10% (0-20%)	4.58	-27	-86	-8	
159	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 30% (30-60 %)	3.51	-27	-97	-3	
	Gyrus occipitalis medius	R	Area 18: 10% (0-40%)	4.35	30	-92	5	
	Gyrus lingualis	R	Area 18: 50% (40-50%)	3.94	24	-86	-5	
77	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 40% (30-70%)	3.86	90	-89	0	
	Gyrus fusiformis	R		2.69	32	-81	3	
18	Lobulus parietalis superior	L	hIP: 20% (0-40%)	4.65	-32	-59	30	
	Lobulus parietalis superior	L		2.58	-35	-70	54	
	Lobulus parietalis inferior	L	hIP: 40% (20-40%)	3.18	-32	-59	41	
	Gyrus angularis	L		3.76	-43	-67	49	
18	Posteriores Cingulum	L		3.16	-8	-40	27	
	Mittleres Cingulum	L		2.86	0	-38	35	

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang L: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline über alle 11 Männer

Tab.III: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen Baseline in Studie 2 über alle 11 Männer. FWE-korrigiert $p=.05$, extent threshold: 10 Voxel. Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahrscheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)		
					x	y	z
3223	Gyrus lingualis	R	Area 18: 80% (70-90%)	10.6	8	-78	-3
	Gyrus lingualis	L	Area 18: 30% (20-40%)	14.04	-13	-81	-13
	Gyrus lingualis	L	Area 17: 80% (70-90%)	10.47	0	-78	0
	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 80% (40-100%)	10.57	14	-84	0
	Gyrus calcarinus	L	Area 17: 90% (70-100%)	10.34	0	-86	-3
	Gyrus occipitalis superior	R		8.76	22	-86	27
	Gyrus occipitalis superior	L		9.91	-22	-81	22
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 18: 20% (0-50%)	8.18	-16	-92	19
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 17: 60% (50-70%)	7.82	-8	-94	8
	Gyrus occipitalis medius	R	Area 18: 10% (0-10%)	8.63	30	-86	22
	Gyrus occipitalis medius	R		8.55	30	-73	32
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 17: 70% (70-90%)	7.61	-11	-94	0
	Cerebellum	R		11.77	24	-46	-22
	Cerebellum	L	Area 18: 10% (0-10%)	7.3	-27	-67	-90
	Cuneus	R	Area 18: 60% (50-70%)	8.6	14	-92	22
	Präcuneus	R		8.85	16	-70	49
	Präcuneus	R	Area 3a: 50% (20-60%)	7.90	11	-43	57
	Präcuneus	R	Area 18: 10% (10-10%)	7.01	16	-62	30
	Präcuneus	L	Area 4p: 20% (10-20%)	7.79	-11	-51	70
	Präcuneus	L		6.57	-5	-57	70
	Lobulus parietalis superior	R	Area 2: 20% (20-30%)	7.78	19	-51	68
	Lobulus parietalis superior	L	Area 1: 30% (0-50%)	7.38	-24	-46	70
	Lobulus parietalis superior	L	Area 2: 10% (0-20%)	7.32	-19	-54	65
	Gyrus präcentralis	L	Area 4a: 40% (30-60%)	11.08	-38	-22	57
	Gyrus präcentralis	L	Area 6: 80% (70-90%)	8.91	-40	-16	65
	Gyrus präcentralis	L		8.68	-38	-19	70
	Gyrus postcentralis	L		8.68	-54	-22	57
	Gyrus postcentralis	L	Area 4p: 40% (20-50%)	7.83	-32	-32	62
	Gyrus postcentralis	L	Area 1: 60% (50-60%)	6.32	-30	-40	68
	Gyrus postcentralis	L	Area 3a: 50% (20-60%)	6.30	-35	-30	646
	Gyrus postcentralis	L	Area 2: 60% (40-60%)	6.23	-32	-35	51
Lobulus paracentralis	R	Area 4a: 70% (50-70%)	6.74	5	-40	60	
Lobulus paracentralis	R	Area 3a: 60% (30-80%)	6.65	14	-35	57	
Gyrus frontalis superior	L	Area 6: 40% (30-40%)	9.45	-24	-3	62	

Anhang L: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline über alle 11 Männer

	Gyrus parahippocampalis	R		7.33	27	-43	-3
	Gyrus fusiformis	L	Area 18: 10% (0-10%)	6.54	-24	-70	-5
75	Lobulus parietalis superior	L		6.63	-11	-76	51
70	Gyrus frontalis superior	R	Area 6: 40% (30-40%)	8.1	24	-5	62
40	Gyrus frontalis medius	L	Area 6 (SMA): 70% (70-90%)	7.38	-5	-5	62
31	Lobulus paracentralis	L	Area 6: 40% (40-60%)	7.36	-8	-19	54
23	Gyrus temporalis medius	R	hOC5: 20% (10-30%)	6.88	41	-62	11
12	Thalamus	L		6.53	-13	-19	14

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang M: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Kontrolle über alle Männer

Tab.IV: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen D5 (Kontrollbedingung = Laufen auf dem Strich) in Studie 2 über alle 11 Männer. $p=.01$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahrscheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
197	Hippocampus	R	30% (0-70%)	3.10	38	-22	-11	
154	Mittleres Cingulum	R		3.73	8	-16	35	
	Mittleres Cingulum	L	Area 6: 10% (0-10%)	3.03	0	-22	41	
	Gyrus postcentralis	R	Area 3a: 40% (0-60%)	3.15	41	-11	27	
89	Gyrus occipitalis medius	R	Area 18: 20% (0-60%)	4.47	30	-92	3	*
	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 40% (30-70%)	3.48	19	-89	0	*
80	Nucleus caudatus	R		4.15	11	16	11	*
	Gyrus frontalis inferior (Triangularis)	R		3.27	32	19	24	
66	Präcuneus	R		3.06	5	-54	43	
	Präcuneus	L		3.22	-8	-59	38	
	Mittleres Cingulum	L		2.79	-13	-51	38	
54	Cuneus	L	Area 17: 80% (60-90%)	3.32	-13	-92	0	
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 10% (0-30%)	3.22	-24	-92	0	
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 17: 20% (0-30%)	2.61	-19	-89	5	
29	Gyrus temporalis superior	R		3.16	57	-27	5	
15	Thalamus	L		3.42	0	-16	8	
14	Posteriores Cingulum	L		2.83	-5	-38	30	
14	Anteriores Cingulum	R		3.58	3	30	16	*
14	Hippocampus	L	CA: 70% (0-90%)	3.33	-19	-40	8	

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlanten dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang N: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline über alle 7 Frauen

	Präcuneus	L	Area 1: 10% (0-10%)	6.25	-11	-59	70
14	Präcuneus	L		7.12	-16	-65	62

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang O: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Kontrolle über alle 7 Frauen

Tab.VI: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen D5 (Kontrollbedingung = Laufen auf dem Strich) in Studie 2 über alle 7 Frauen. $p=.01$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxel)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahrscheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
162	Gyrus lingualis	L	Area 18: 50% (20-60%)	5.05	-13	-89	-5	*
	Gyrus calcarinus	L	Area 17: 40% (40-70%)	2.56	-16	-97	-5	
	Gyrus occipitalis inferior	L		4.30	-24	-84	-3	*
	Gyrus occipitalis inferior	L	Area 18: 20% (0-30%)	3.67	-32	-92	-8	
	Cerebellum	L		2.72	-32	-78	-19	
	Posteriores Cingulum	R		3.66	8	-40	24	*
	Präcuneus	R		3.33	14	-57	38	
58	Gyrus lingualis	R	Area 18: 30% (10-60%)	3.81	19	-78	-3	*
	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 100% (80-100%)	3.28	16	-81	3	
	Gyrus fusiformis	R		2.53	30	-70	-3	

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang P: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline, externe Strategie

Tab.VII: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen Baseline in Studie 2 über alle 5 Pbn mit externaler Strategie. FWE-korrigiert $p=.05$, extent threshold: 10 Voxel. Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxel)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)		
					x	y	z
508	Gyrus lingualis	R	Area 18: 80% (60-90%)	8.81	11	-73	-8
	Gyrus lingualis	R	Area 17: 100% (70-100%)	7.11	16	-76	3
	Gyrus lingualis	R		6.58	22	-65	-8
	Gyrus lingualis	L	Area 17: 80% (70-90%)	6.74	0	-78	0
	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 100% (80-100%)	7.65	14	-81	3
	Gyrus calcarinus	L	Area 17: 80% (70-80%)	7.30	0	-89	0
	Gyrus calcarinus	L	Area 18: 80% (50-100%)	7.28	5	-84	11
	Gyrus occipitalis medius	R		8.80	30	-81	19
	Gyrus occipitalis superior	R		7.85	22	-86	24
	Cuneus	R	Area 18: 90% (80-100%)	7.84	8	-86	14
Gyrus fusiformis	R		6.73	24	-65	-13	
Cerebellum	R	Area 18: 10% (0-40%)	6.16	11	-59	-8	
88	Gyrus occipitalis superior	L	Area 17: 10% (10-10%)	8.87	-22	-92	22
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 18: 40% (10-60%)	7.82	-16	-94	22
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 10% (10-10%)	6.25	-30	-86	22
49	Cerebellum	L	Area 18: 10% (0-20%)	9.15	-19	-73	-16
39	Cerebellum	R		7.43	24	-49	-22
22	Gyrus präcentralis	L	Area 4a: 30% (30-70%)	7.85	-35	-27	62
16	Lobulus parietalis superior	R		6.47	19	-62	57
14	Gyrus frontalis superior	R	Area 6: 30% (20-50%)	6.41	22	-3	59
13	Lobulus parietalis superior	L	Area 2: 10% (0-10%)	6.47	-19	-49	68
11	Gyrus frontalis superior	L	Area 6: 30% (20-40%)	6.56	-22	0	62

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang Q: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Kontrolle, externe Strategie

Tab.VIII: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen D5 (Kontrollbedingung = Laufen auf dem Strich) in Studie 2 über alle 5 Pbn mit externer Strategie. $p=.01$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
116	Präcuneus	R		3.68	8	-57	49	*
	Lobulus parietalis inferior	R	hIP1: 10% (0-10%)	3.28	30	-54	30	*
	Gyrus occipitalis medius	R	hIP1: 10% (0-20%)	3.09	35	-62	35	
	Posteriores Cingulum	R		3.02	14	-46	16	
114	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 20% (10-40%)	3.75	-19	-89	-3	*
	Gyrus occipitalis inferior	L		3.62	-32	-84	-11	*
	Gyrus occipitalis inferior	L	Area 18: 30% (20-30%)	2.76	-24	-94	-3	
	Gyrus lingualis	L	Area 18: 50% (20-60%)	3.46	-13	-89	-5	
	Cerebellum	L		2.47	-32	-78	-19	
80	Lobulus parietalis inferior	L	hIP1: 30% (20-30%)	3.15	-30	-59	38	*
	Lobulus parietalis inferior	L		2.88	-32	-70	43	
	Präcuneus	L		3.01	-16	-59	35	
22	Präcuneus	R	hIP1: 10% (0-30%)	3.40	27	-54	43	*
20	Hippocampus	L	SUB 10% (0-80%)	4.02	-16	-24	-13	*
16	Gyrus lingualis	R	Area 18: 40% (20-50%)	3.03	19	-86	-5	
15	Gyrus occipitalis medius	L	Area 17: 10% (10-10%)	3.42	-24	-92	19	*
15	Hippocampus	R	CA 80% (40-90%)	3.17	22	-35	-5	

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang R: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline, internele Strategie

Tab.IX: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen Baseline in Studie 2 über alle 10 Pbn mit internaler Strategie. FWE-korrigiert $p=.05$, extent threshold: 10 Voxel. Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)		
					x	y	z
5009	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 80% (40-100%)	13.87	14	-84	0
	Gyrus calcarinus	L	Area 17: 70% (70-90%)	11.56	0	-86	0
	Gyrus calcarinus	L	Area 18: 60% (0-60%)	10.44	-5	-92	8
	Gyrus lingualis	R	Area 18: 80% (70-90%)	12.97	8	-78	-3
	Gyrus lingualis	R		9.48	24	-67	0
	Gyrus lingualis	R	Area 17: 30% (0-40%)	7.50	27	-57	-3
	Gyrus lingualis	L	Area 17: 80% (70-90%)	12.60	0	-78	0
	Gyrus lingualis	L	Area 18: 30% (20-40%)	11.28	-11	-81	-13
	Gyrus lingualis	L		8.18	-24	-43	-5
	Gyrus occipitalis superior	R	Area 18: 40% (30-60%)	10.01	16	-89	22
	Gyrus occipitalis superior	R		9.36	24	-84	30
	Gyrus occipitalis superior	L		11.35	-22	-81	24
	Gyrus occipitalis superior	L	Area 18: 10% (10-10%)	10.81	-24	-86	24
	Gyrus occipitalis medius	R		10.61	32	-78	16
	Gyrus occipitalis medius	R	hOC5: 10% (0-10%)	6.64	43	-76	11
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 10% (0-10)	9.31	-32	-86	22
	Gyrus occipitalis medius	L		8.89	-32	-84	16
	Gyrus occipitalis medius	L	hOC5: 30% (10-30%)	7.13	-40	-76	14
	Cerebellum	R		12.95	22	-43	-22
	Cerebellum	L	Area 18: 10% (0-10%)	8.31	-27	-67	-19
	Vermis			5.75	5	-54	-19
	Cuneus	R		10.45	19	-84	24
	Cuneus	R	Area 18: 40% (10-60)	7.40	14	-70	22
	Cuneus	L	Area 18: 10% (10-10%)	6.81	-19	-59	24
	Präcuneus	R		10.24	16	-67	46
	Präcuneus	R	Area 3a: 50% (40-50%)	9.29	8	-46	62
	Präcuneus	L	Area 3b: 10% (0-10)	9.48	-16	-54	68
	Präcuneus	L		6.94	-13	-65	35
	Lobulus parietalis superior	R	Area 2: 20% (20-30%)	10.05	19	-51	68
	Lobulus parietalis superior	R		9.96	16	-70	51
	Lobulus parietalis superior	L	Area 1: 20% (20-20%)	9.18	-24	-49	68
	Lobulus parietalis superior	L		8.83	-19	-73	41
Gyrus fusiformis	R	Area 18: 10% (10-20%)	8.22	27	-73	-5	
Gyrus fusiformis	R		6.89	27	-57	-13	
Gyrus fusiformis	L	Area 18: 10% (10-20%)	11.37	-22	-81	-11	
Gyrus fusiformis	L		9.71	-30	-76	-13	
Gyrus temporalis medius	R	hOC5: 10% (0-30%)	7.86	43	-65	11	

Anhang R: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Baseline, internele Strategie

	Gyrus temporalis medius	R		7.46	46	-73	22
	Gyrus frontalis superior	L	Area 6: 20% (0-40%)	11.21	-24	-3	59
	Gyrus postcentralis / Lobulus parietalis superior	R	Area 3b: 40% (30-70%)	6.76	16	-40	59
	Gyrus postcentralis	L	Area 1: 90% (80-90%)	10.63	-54	-22	51
	Gyrus postcentralis	L	Area 4p: 40% (20-50%)	9.94	-32	-32	62
	Gyrus postcentralis	L	Area 2: 100% (40-100%)	6.62	-46	-24	43
	Gyrus präcentralis	L	Area 6: 60% (40-90%)	10.12	-38	-19	59
	Lobulus paracentralis	R	Area 3a: 60% (30-80%)	6.51	14	-35	57
	Gyrus frontalis superior	L	Area 6 (SMA): 40% (40-60%)	8.42	-16	-8	65
98	Gyrus frontalis superior	R	Area 6: 30% (30-40%)	8.78	27	-5	65
34	Gyrus postcentralis	R	Area 1: 60% (20-90%)	6.45	32	-38	65
	Gyrus postcentralis	R	Area 3b: 70% (50-80%)	6.27	35	-38	59
	Gyrus postcentralis	R	Area 2: 80% (20-100%)	5.74	41	-32	51
31	Thalamus	L		7.17	-13	-19	8
26	Mittleres Cingulum	R	Area 6: 20% (10-40%)	7.71	11	-16	46
13	Thalamus	R		6.32	19	-24	16
10	Rolandisches Operkulum	L	OP1: 80% (50-90%)	6.38	-46	-24	19

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchem cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Anhang S: Tab. der aktivierten anat. Strukturen Nav. vs Kontrolle, internele Strategie

Tab.X: Aktivierte anatomische Strukturen der Navigationsbedingungen D3 (letzter Lerndurchgang) und D4 (Testdurchgang) gegen D5 (Kontrollbedingung = Laufen auf dem Strich) in Studie 2 über alle 10 Pbn mit internaler Strategie. $p=.01$, unkorrigiert, extent threshold: 10 Voxel. (*=unkorrigiert $p < .001$; ** FDR $p < .05$; *** FWE $p < .05$). Angegeben ist jeweils nur das größte Maximum pro Struktur.

Clustergröße (in Voxeln)	Anatomische Struktur	Hemisphäre	Cytoarchitektonisch bestimmtes/ funktionelles Areal & dessen Wahr- scheinlichkeit*	T-Wert (df=48)	Koordinaten MNI (mm)			Signifikanz
					x	y	z	
65	Gyrus lingualis	L	Area 17: 40% (30-70%)	3.79	-13	-89	-3	*
	Gyrus occipitalis medius	L	Area 18: 40% (20-50%)	3.40	-16	-92	-5	
	Gyrus occipitalis medius	L		3.26	-27	-89	-3	*
	Gyrus occipitalis inferior	L		2.65	-32	-84	-11	
	Gyrus fusiformis	L		2.70	-32	-78	-13	
30	Anteriores Cingulum	L		2.70	-11	35	22	
27	Gyrus calcarinus	R	Area 17: 50% (10-60%)	3.40	27	-92	0	*
	Gyrus lingualis	R	Area 18: 50% (40-50%)	2.96	24	-86	-5	
12	Gyrus angularis	L		3.32	-43	-67	49	*
	Lobulus parietalis superior	L		3.32	-35	-70	54	*

*In dieser Spalte sind die Wahrscheinlichkeiten angegeben, mit der das aktivierte Cluster einem funktionellen Hirnareal zuzuordnen ist, sofern diese Information verfügbar ist. Diese Angaben basieren auf dem Anatomy Tool 1.5 in SPM 5 von (Eickhoff et al., 2007; Eickhoff et al., 2005). Auf welchen cytoarchitektonischen Atlas dies jeweils beruht, ist im Text angegeben.

Lebenslauf

Name Sophie Marie Hinrichs
geboren 30.06.1979 in Bremen
Staatsangehörigkeit deutsch
Familienstand ledig

Ausbildung

1992 – 1999 Altes Gymnasium Bremen
02.07.1999 Abitur
1999 – 2005 Psychologiestudium an der Georg-August-Universität Göttingen
14.10.2005 Diplom in Psychologie

Beruflicher Werdegang

2000 – 2002 Studentische Hilfskraft in der Abteilung „Kognitions- und Arbeitspsychologie“ des Georg-Elias-Müller-Instituts für Psychologie in Göttingen
2002 Praktikum im NLKH Moringen, Fachkrankenhaus für forensische Psychiatrie
2003 Auslandsaufenthalt Türkei
2003 – 2005 Studentische Hilfskraft in der Abteilung „Kognitions- und Arbeitspsychologie“ des Georg-Elias-Müller-Instituts für Psychologie in Göttingen
2004 – 2005 Studentische Hilfskraft in der Abteilung Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie der Universitätsmedizin Göttingen
2005 Praktikum beim Frauen-Notruf Göttingen e.V. (Beratung zu sexueller Gewalt und Gewalt in der Partnerschaft)
2005 – 2006 Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie der Universitätsmedizin Göttingen
2006 – 2008 Studienfachberaterin für den Studiengang Psychologie (Bachelor, Master, Diplom) am Georg-Elias-Müller-Institut für Psychologie in Göttingen, sowie Praktikumskoordinatorin
2007 – 2008 Lehrbeauftragte der Universitätsmedizin Göttingen für das Seminar „Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie“ im Rahmen der vorklinischen Ausbildung für Mediziner

Göttingen, den 15.09.08

Sophie Hinrichs