

**Expertise bei der Antizipation
sportmotorischer Handlungseffekte:
Neuronale Aktivierung motorik-relevanter Gehirnareale**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Philosophie des Fachbereiches Psychologie und Sportwissenschaft

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Nils Henning Balsler

aus Biebental

2014

Dekan: Prof. Dr. Marco Ennemoser

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Jörn Munzert

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Rudolf Stark

Tag der Disputation:

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1 Theoretischer Hintergrund	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Expertise im Sport.....	3
1.2.1 Die verschiedenen Ausprägungsformen von Expertise im Sport	4
1.2.2 Deliberate Practice	6
1.2.3 Expert Performance Approach	9
1.2.4 Antizipation im Sport	18
1.3 Die gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung.....	25
1.3.1 Die Common-Coding Theorie	26
1.3.2 Interne Modelle.....	30
1.4 Das Spiegelneuronensystem.....	31
1.4.1 Funktionen des Spiegelneuronensystems	33
1.4.2 Die Anatomie des menschlichen Spiegelneuronensystems	34
1.5 Das Action Observation Network	35
1.5.1 Die Anatomie des Action Observation Networks	36
1.5.2 Die Funktion des Action Observation Networks	37
1.5.3 Die Direct Matching und die Predictive Coding Theorie	39
1.5.4 Einflussfaktoren des Action Observation Networks.....	42
1.5.5 Neuronale Implementierung der internen Modelle in den Arealen des Action Observation Networks	46
1.6 Fragestellung der vorliegenden Arbeit.....	47
2 Experiment 1 – Effektantizipation von Tennisexperten und -novizen	50
2.1 Fragestellung	50
2.2 Hypothesen.....	51
2.3 Methode.....	52
2.3.1 Versuchspersonen	52
2.3.2 Stimulusmaterial	53
2.3.3 Aufgabe und Instruktionen	55
2.3.4 Versuchsablauf	57

2.3.5	Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der Verhaltensdaten	59
2.3.6	Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der fMRT-Daten	60
2.4	Ergebnisse	66
2.4.1	Behaviorale Daten	67
2.4.2	Hirnphysiologische Daten	69
2.5	Diskussion	78
2.5.1	Die Antizipationsleistung der beiden Experimentalgruppen	79
2.5.2	Expertiseunabhängige Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten.....	80
2.5.3	Expertiseabhängige Aktivierung des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten	81
2.5.4	Der Einfluss unterschiedlicher Instruktionen auf die Aktivierung des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten.....	87
2.5.5	Limitationen.....	90
2.5.6	Fazit	92
3	Experiment 2 – Effektantizipation von Tennis- und Volleyballexperten	93
3.1	Fragestellung	93
3.2	Hypothesen.....	94
3.3	Methode.....	95
3.3.1	Versuchspersonen	95
3.3.2	Stimulusmaterial	96
3.3.3	Aufgabe und Instruktionen	99
3.3.4	Versuchsablauf	100
3.3.5	Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der Verhaltensdaten	101
3.3.6	Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der fMRT-Daten	102
3.4	Ergebnisse	105
3.4.1	Behaviorale Daten	105
3.4.2	Hirnphysiologische Daten	107
3.5	Diskussion	115
3.5.1	Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Effektantizipation unabhängig von der Expertise der Probanden	116
3.5.2	Vergleich der Antizipationsleistung zwischen beiden Expertisegruppen	117
3.5.3	Expertiseabhängige Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Effektantizipation	119

3.5.4	Gemeinsamkeiten in der Aktivierung des Action Observation Networks in der Expertise- und der Novizensportart.....	123
3.5.5	Limitationen.....	125
3.5.6	Fazit	126
4	Fazit und Ausblick.....	128
5	Literaturverzeichnis	132
	Anhang.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Beispielhafte Darstellung der Videostimuli aller drei Bedingungen. (A) Vorhandschlag des männlichen Modells (<i>Motorische und Räumliche Antizipationsbedingung</i>). (B) Weibliches Modell beim Ballprellen mit dem Tennisschläger (<i>Reine Beobachtungsbedingung</i>). (C) Gelber Ball, der sich auf einer sinusförmigen Trajektorie nach unten bewegt und zu einem zufälligen Zeitpunkt verschwindet (<i>Nur Ball Antizipationsbedingung</i>). Die eingezeichnete Trajektorie in grau dient lediglich der Illustration und war für die Versuchsteilnehmer nicht zu sehen (Balser et al., 2014).	54
Abb. 2	Schematische Darstellung der Zielzonen, die von den Modellen getroffen werden mussten. Es wurden ausschließlich Treffer dieser Zonen als Stimuli für die Antizipationsbedingungen im Tennis verwendet.	54
Abb. 3	Aufbau und Ablauf der 144 Experimentaltrials. Jeder der 24 Miniblocke setzte sich aus sechs Trials einer Versuchsbedingung zusammen und begann mit einem Instruktionsschirm. Die sechs Trials starteten jeweils mit der Präsentation eines Fixationskreuzes, gefolgt von einem Videostimulus und der anschließenden Antwortphase. Sowohl die Verteilung der Miniblocke als auch der Videostimuli erfolgte dabei für alle Probanden randomisiert (Balser et al., 2014; Beschriftung geändert).	59
Abb. 4	Vergleich der Normalisierung auf das ICBM-152- (A + B) und das SUIT-Template (C + D). Eingezeichnet sind dabei die Positionen der primären Fissur (A + C) sowie der Fissura intraventricularis (B + D) von 16 Probanden (aus Diedrichsen, 2006, mit Erlaubnis des Verlags Elsevier).	63
Abb. 5	Mittelwerte der korrekten Antworten in Prozent von allen 32 Probanden für die beiden Tennis Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertiseniveau (Tennisexperten, Tennisnovizen) sowie nach Antizipationsbedingung (<i>Motorische Antizipationsbedingung, Räumliche Antizipationsbedingung</i>).	68
Abb. 6	Antwortzeiten in Millisekunden von allen 32 Probanden für die beiden Tennis Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertiseniveau (Tennisexperten, Tennisnovizen) sowie nach Antizipationsbedingung (<i>Motorische Antizipationsbedingung, Räumliche Antizipationsbedingung</i>).	68
Abb. 7	Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts <i>Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung</i> für alle 32 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5.8 und 10) (Balser et al., 2014; Beschriftung geändert).	71
Abb. 8	Darstellung der signifikanten Aktivierung des Between-Subject-Vergleichs der Tennisexperten und der Tennisnovizen für den Kontrast <i>Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung</i> (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 2.5 und 4.5) (Balser et al., 2014; Beschriftung geändert).	74

Abb. 9	(A) Darstellung der signifikanten Aktivierung der Tennisnovizen im Between-Subject-Vergleich mit den Tennisexperten für den Kontrast <i>Motorische Antizipationsbedingung</i> > <i>Räumliche Antizipationsbedingung</i> (blau). (B) Darstellung der signifikanten Aktivierung innerhalb der 16 Tennisexperten für den Kontrast <i>Motorische Antizipationsbedingung</i> > <i>Räumliche Antizipationsbedingung</i> (rot) sowie den umgekehrten Kontrast <i>Räumliche Antizipationsbedingung</i> > <i>Motorische Antizipationsbedingung</i> (blau). (C) Darstellung der signifikanten Aktivierung innerhalb der 16 Tennisnovizen für den Kontrast <i>Motorische Antizipationsbedingung</i> > <i>Räumliche Antizipationsbedingung</i> (rot). (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 3 und 5) (Balsler et al., 2014; Beschriftung geändert).	76
Abb. 10	Beispielhafte Darstellung der Videostimuli aller vier Bedingungen. (A) Tennisaufschlag des männlichen Tennismodells (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i>). (B) Weibliches Tennismodell beim Ballprellen mit dem Tennisschläger (<i>Tennis Beobachtungsbedingung</i>). (C) Volleyballaufschlag des weiblichen Volleyballmodells (<i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>). (D) Männliches Volleyballmodell beim Ballprellen mit der Hand (<i>Volleyball Beobachtungsbedingung</i>).	98
Abb. 11	Schematische Darstellung der Zielzonen für die Tennis- (A) und die Volleyballaufschläge (B), die von den Modellen getroffen werden mussten. Es wurden ausschließlich Treffer dieser Zonen als Stimuli für die Antizipationsbedingungen verwendet.	98
Abb. 12	Aufbau und Ablauf der 128 Experimentaltrials. Jeder Trial startete mit der Präsentation eines Instruktionsschirms, gefolgt von einem Fixationskreuz, einem Videostimulus sowie der anschließenden Antwortphase. Die Verteilung der Videostimuli erfolgte dabei für alle Probanden randomisiert.	101
Abb. 13	Mittelwerte der korrekten Antworten in Prozent von allen 31 Probanden für die beiden Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertisesportart (Tennisexperten, Volleyballexperten) sowie nach Antizipationsbedingung (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i> , <i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>).	106
Abb. 14	Antwortzeiten in Millisekunden von allen 31 Probanden für die beiden Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertisesportart (Tennisexperten, Volleyballexperten) sowie nach Antizipationsbedingung (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i> , <i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>).	107
Abb. 15	Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i> + <i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>) > (<i>Tennis Beobachtungsbedingung</i> + <i>Volleyball Beobachtungsbedingung</i>) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5 und 14).	110
Abb. 16	Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts (<i>Antizipationsbedingung Expertisesportart</i> > <i>Beobachtungsbedingung Expertisesportart</i>) > (<i>Antizipationsbedingung Novizensportart</i> > <i>Beobachtungsbedingung Novizensportart</i>) für alle 31 Probanden (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 2 und 4).	112

Abb. 17	Darstellung der signifikanten Aktivierung der Conjunction-Analyse des Kontrasts (<i>Expertisesportart Antizipation</i> > <i>Expertisesportart Beobachtung</i>) \cap (<i>Novizensportart Antizipation</i> > <i>Novizensportart Beobachtung</i>) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5 und 20).	115
---------	--	-----

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Instruktionen der vier verschiedenen Experimentalbedingungen in Experiment 1.....	57
Tab. 2	Ergebnisse der Ganzkopfanalyse des Kontrasts <i>Tennis Antizipationsbedingung</i> > <i>Reine Beobachtungsbedingung</i> für alle 32 Probanden.	71
Tab. 3	Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung Tennis“ auf den Kontrast <i>Tennis Antizipationsbedingung</i> > <i>Reine Beobachtungsbedingung</i> für alle 32 Probanden (ROI-Analyse).	72
Tab. 4	Ergebnisse des Between-Subject-Vergleichs der Tennisexperten und der Tennismovizen für den Kontrast <i>Tennis Antizipationsbedingung</i> > <i>Reine Beobachtungsbedingung</i> (ROI-Analyse).	73
Tab. 5	Der Einfluss der Parameter „Antizipationsleistung Tennis“ und „Trainingsalter“ auf den Kontrast <i>Tennis Antizipationsbedingung</i> > <i>Reine Beobachtungsbedingung</i> innerhalb der Tennisexperten (ROI-Analyse).	75
Tab. 6	Ergebnisse der ROI-Analyse des Kontrasts <i>Motorische Antizipationsbedingung</i> > <i>Räumliche Antizipationsbedingung</i> sowohl für alle 32 Probanden als auch im Between-Subject-Vergleich sowie innerhalb der Gruppen.	77
Tab. 7	Instruktionen der vier verschiedenen Experimentalbedingungen in Experiment 2.....	100
Tab. 8	Ergebnisse der Ganzkopfanalyse des Kontrasts (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i> + <i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>) > (<i>Tennis Beobachtungsbedingung</i> + <i>Volleyball Beobachtungsbedingung</i>) für alle 31 Probanden.	109
Tab. 9	Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung“ auf den Kontrast (<i>Tennis Antizipationsbedingung</i> + <i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>) > (<i>Tennis Beobachtungsbedingung</i> + <i>Volleyball Beobachtungsbedingung</i>) für alle 32 Probanden (ROI-Analyse).	110
Tab. 10	Ergebnisse der ROI-Analyse des Kontrasts (<i>Antizipationsbedingung Expertisesportart</i> > <i>Beobachtungsbedingung Expertisesportart</i>) > (<i>Antizipationsbedingung Novizensportart</i> > <i>Beobachtungsbedingung Novizensportart</i>) für alle 31 Probanden.	112
Tab. 11	Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung Expertisesportart“ auf den Kontrast <i>Antizipationsbedingung Expertisesportart</i> > <i>Beobachtungsbedingung Expertisesportart</i> für alle 31 Experten (ROI-Analyse).	113
Tab. 12	Ergebnisse der Conjunction-Analyse des Kontrasts (<i>Expertisesportart Antizipation</i> > <i>Expertisesportart Beobachtung</i>) \cap (<i>Novizensportart Antizipation</i> > <i>Novizensportart Beobachtung</i>) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse).	114

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ACC	anteriorer cingulärer Kortex
ALM	allgemeines lineares Modell
ANOVA	Analysis of Variance
AON	Action Observation Network
BOLD	Blood-Oxygenation-Level Dependent
cm	Zentimeter
d	Cohens d
dPMC	dorsaler prämotorischer Kortex
ed.	Edition
Eds.	Editors
EEG	Elektroenzephalografie
EPI	Echo Planar Imaging
et al.	et alii
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
FoV	Field of View
FWE	Family-Wise-Error
Hrsg.	Herausgeber
IFG	inferiorer frontaler Gyrus
IPL	inferiorer Parietallappen
IPS	intraparietaler Sulcus
Kap.	Kapitel
M	Mittelwert

M1	präzentraler Gyrus
MCC	mittlerer cingulärer Kortex
mm	Millimeter
MOG	mittlerer orbitaler Gyrus
MNI	Montreal Neurological Institute
MPRAGE	Magnetized Prepared Rapidly Acquired Gradient Echo
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunden
MTG	mittlerer temporaler Gyrus
n.s.	nicht signifikant
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
pp.	Pages
PLD	Point-Light-Display
PMC	prämotorischer Kortex
ROI-Analyse	Region-of-Interest-Analyse
rTMS	repetitive transkranielle Magnetstimulation
s	Sekunden
S1	primärer somatosensorischer Kortex
SN	Spiegelneuronen
SNS	Spiegelneuronensystem
S.	Seite
SD	Standardabweichung
SMA	supplementär-motorisches Areal
SMG	superiorer medialer Gyrus
sog.	sogenannte, sogenannter, sogenanntes
SPL	superiorer Parietallappen

SUIT	Spatially Unbiased Infratentorial Template
TA	Time of Acquisition
Tab.	Tabelle
TE	Time to Echo
TMS	transkranielle Magnetstimulation
TR	Time of Repetition
vPMC	ventraler prämotorischer Kortex

Symbole

η^2	Eta-Quadrat
\cap	Schnittmenge
&	und
°	Grad
>	größer
<	kleiner
×	mal
+	plus
±	plusminus
%	Prozent

1 Theoretischer Hintergrund

1.1 Einleitung

„Wenn der Gegner mit Tempo 200 dir einen Ball rüberjagt, brauchst du die feinste Motorik, um den Ball noch genau zu treffen. Nicht zu früh, nicht zu spät, nicht zu hoch, nicht zu flach. Das geht nur, wenn du Tennisschläge antizipieren kannst.“¹ – Aussagen wie diese sind in der Sportpraxis häufig zu hören und verdeutlichen, dass auch Athleten und Verantwortliche, wie der ehemalige Trainer des Weltklasespielers Novak Djokovic, Niki Pilic, um die Bedeutung der Effektantizipation beim Handeln unter Zeitdruck wissen. In schnellen Sportsportarten sind die Athleten darauf angewiesen die Effekte von Handlungen ihres Gegenspielers frühzeitig zu erkennen. So muss sich der Returnspieler im Tennis bereits für eine angemessene Reaktion entscheiden bevor der Schläger des aufschlagenden Spielers den Ball trifft, da er anderenfalls nicht genügend Zeit hätte, um seine Reaktion rechtzeitig auszuwählen und auszuführen (Williams et al., 2011). Dass die Antizipation einen bedeutsamen Aspekt der Expertise von Athleten darstellt, konnte die Expertiseforschung mit zahlreichen Studien in unterschiedlichen Sportarten durch bessere Antizipationsleistungen der Experten im Vergleich zu weniger erfahrenen Sportlern nachweisen (für einen Überblick siehe Mann et al., 2007). Die umfassende Analyse von Expertise im Sport erfordert gemäß des Expert Performance Approach von Ericsson und Smith (1991) neben einer Beschreibung der Leistungsunterschiede aber auch die Identifizierung der Mechanismen, die Expertenleistungen zu Grunde liegen. Durch die Verwendung von Systemen zur Registrierung von Blickbewegungen und den Einsatz von Stimuli mit manipulierten Bewegungstrajektorien konnte gezeigt werden, dass Experten zur Antizipation von Handlungseffekten auf andere Wahrnehmungsstrategien und insbesondere kinematische Informationen zurückgreifen (siehe beispielsweise Schorer et al., 2013; Williams et al., 2009). Es ist jedoch weitestgehend unklar, wie diese Informationen auf neuronaler Ebene verarbeitet werden und inwiefern sich die Verarbeitungsprozesse zwischen Experten und Novizen unterscheiden.

Sowohl Verhaltensstudien als auch Studien aus dem Bereich der Neurowissenschaften haben Hinweise darauf gefunden, dass die Ausführung und die Wahrnehmung von Bewegungen, zumindest teilweise, gemeinsam repräsentiert sind (siehe beispielsweise Knoblich & Flach,

¹ Spiegel Online, Interview mit dem Tennistrainer Niki Pilic, Zugriff am 27.12.2013, <http://www.spiegel.de/sport/sonst/interview-mit-niki-pilic-ueber-djokovic-nadal-und-french-open-a-901970.html>

2001; Prinz, 1997; Rizzolatti & Craighero, 2004). Demnach werden motorische Repräsentationen auch genutzt, um Bewegungen von anderen Personen wahrzunehmen. Als Funktion des Action Observation Networks (AON), das alle an der Bewegungswahrnehmung beteiligten Gehirnareale beinhaltet und somit auch motorik-assoziierte Areale inkludiert (Cross et al., 2010), diskutieren zahlreiche Autoren insbesondere die Vorhersage von Handlungseffekten (siehe beispielsweise Gazzola & Keysers, 2009 und Zentgraf et al., 2011). Sowohl für die Vorhersage von Alltagsbewegungen (Avenanti et al., 2013; Stadler et al., 2011, 2012; Urgesi et al., 2010) als auch für die Effektantizipation im Sport (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011) konnte Aktivierung in prämotorischen und parietalen Arealen des AON gefunden werden. Die ersten Vergleiche zwischen Probanden mit unterschiedlichen Expertiseniveaus zeigten außerdem, dass Expertise in einer Sportart während der Effektantizipation zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON führt (Bishop et al., 2013; Wright et al., 2010, 2011; Wu et al., 2013). Eine mögliche Erklärung für die stärkere Aktivierung des AON, vor allem in motorik-assoziierten Arealen, könnte in der Nutzung von internen Modellen liegen. Interne Modelle dienen während der eigenen Bewegungsausführung unter anderem der Vorhersage des zu erwartenden Effekts (für einen Überblick siehe Wolpert et al., 1998b) und könnten bei der Bewegungsbeobachtung zur Vorhersage von Effekten anderer Personen verwendet werden (Gazzola & Keysers, 2009; Miall, 2003; Wolpert et al., 2003). Neben parietalen und prämotorischen Arealen wird vor allem auch das Cerebellum als wichtiger Bestandteil der internen Modelle diskutiert (Miall, 2003; Kawato et al., 2003; Wolpert et al., 1998b).

Die zwei durchgeführten Studien haben das Ziel den Zusammenhang zwischen eigenen motorischen Repräsentationen innerhalb der Areale des AON und der Vorhersage von Effekten menschlicher Bewegungen unter besonderer Berücksichtigung cerebellärer Strukturen zu untersuchen. Damit sollen neue Erkenntnisse über die Bedeutung des AON und der internen Modelle während der Effektvorhersage sowie über die Mechanismen der besseren Antizipationsleistungen von Experten im Sport gewonnen werden. Dazu wird mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) der Einfluss von Expertise auf die Aktivierung von Arealen des AON während der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen bestimmt. Zum ersten Mal kommt für die Auswertung der hirnpfysiologischen Daten in einer Untersuchung der Effektantizipation dabei die SUIT (Spatially Unbiased Infratentorial Template)-Toolbox (Diedrichsen, 2006) zur präzisen Lokalisierung von Aktivierungen des Cerebellums zum Einsatz. Die erste der beiden durchgeführten Studien soll außerdem ermit-

teln, ob unterschiedliche Instruktionen einen Einfluss auf die Aktivierung des AON haben, wenn das Ziel der Bewegungsbeobachtung in der Effektantizipation besteht. Mit der Verwendung von unterschiedlichen Antwortbedingungen, die durch die verschiedenen Instruktionen vorgegeben werden, wird zudem der Forderung von Farrow und Abernethy (2003) nach validen Untersuchungsbedingungen Rechnung getragen und deren Einfluss auf die Aktivierung des AON untersucht. Um diesen Einfluss auch in Abhängigkeit der Expertise zu ermitteln, findet in der Studie ein Vergleich zwischen Novizen und Tennisexperten statt. In bisherigen Studien zur Untersuchung der neuronalen Prozesse von erfahrenen Athleten während der Antizipation von Handlungseffekten wurden zum Vergleich Novizengruppen gewählt, die weder in der untersuchten Disziplin noch in einer anderen Domäne Expertise aufwiesen. In der zweiten Studie werden hingegen zwei Expertengruppen verglichen, die beide spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besitzen, aber gleichzeitig keine Vorerfahrungen in der jeweils anderen Sportart vorweisen können. Da den Tennis- und Volleyballexperten auch die Stimuli der nicht beherrschten Sportart präsentiert werden, bilden die Experten somit auch die Novizengruppe in der jeweils anderen Bedingung. Demnach ist es durch die zwei unterschiedlichen Expertisegruppen möglich den Einfluss von sportartspezifischer Expertise zu untersuchen.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem Überblick des aktuellen Standes der Expertiseforschung, unter besonderer Berücksichtigung der Antizipation von Handlungseffekten. Des Weiteren stellt Kapitel 1 Verhaltensstudien sowie neurophysiologische Untersuchungen vor, die eine gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung zeigen konnten und die Effektvorhersage als eine wichtige Funktion der eigenen motorischen Repräsentationen diskutieren. Nach der Vorstellung unterschiedlicher Erklärungsansätze hinsichtlich der Funktionsweise der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen schließt das erste Kapitel mit der Ableitung der Fragestellung der vorliegenden Arbeit. In den Kapiteln 2 und 3 werden anschließend die Hypothesen der beiden durchgeführten fMRT-Studien formuliert und die methodischen Aspekte erläutert sowie die Ergebnisse dargestellt und im Hinblick auf die formulierten Hypothesen diskutiert. Im vierten und letzten Kapitel werden die Befunde beider Studien zusammengeführt und abschließend gemeinsam betrachtet.

1.2 Expertise im Sport

Die Ursprünge der klassischen Expertiseforschung gehen auf das Jahr 1965 zurück und hatten nicht, wie man aus heutiger Sicht erwarten würde, den Sport als Untersuchungsgegenstand,

sondern Großmeister im Schach. De Groot (1965) verglich diese mit deutlich schlechteren Spielern und fand heraus, dass sich die beiden Gruppen hinsichtlich ihrer Fähigkeit unterschieden, unbekannte Schachkonstellationen zu einem späteren Zeitpunkt zu rekonstruieren. Bei dieser Aufgabe zeigten die Schachexperten eine signifikant bessere Leistung als die weniger erfahrenen Spieler. Keine Unterschiede fand de Groot (1965) hingegen hinsichtlich der Anzahl durchdachter Züge oder der Geschwindigkeit der Suche. Dass diese Fähigkeit der Experten schachspezifisch war, konnten Simon und Chase (1973) acht Jahre später zeigen, indem sie die Rekonstruktion von Figurenkonstellationen aus dem Schach mit der Rekonstruktion von zufälligen Konstellationen verglichen. Mit dem Expert Performance Approach wurde 1991 von Ericsson und Smith ein Ansatz vorgestellt, der die Voraussetzung für eine detaillierte, systematische Untersuchung von Expertiseleistungen schuf und bis heute Anwendung im Bereich der Expertiseforschung findet. Mithilfe einer Untersuchung der Trainingsbiographien von professionellen Orchestermusikern konnten Ericsson und Kollegen 1993 zeigen, dass jahrelanges zielgerichtetes Training, sogenanntes Deliberate Practice, bei der Entwicklung von Expertise eine entscheidende Rolle spielt. Seit einigen Jahren liegt der Fokus der Expertiseforschung insbesondere auf ökologisch validen Testsituationen sowie den Mechanismen, die Expertenleistungen zugrunde liegen und beschäftigt sich dabei vor allem mit Experten aus dem Sport (für einen Überblick siehe Hagemann et al., 2007). So bringen Athleten unter hohem Stress und sich ununterbrochen ändernden Bedingungen Höchstleistungen und verschieben durch ihr ständiges Streben nach besseren Leistungen die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit. Die Ergebnisse der Expertiseforschung können daher auch in anderen Forschungsbereichen, die sich mit der Verbesserung der menschlichen Leistung auseinandersetzen, wie zum Beispiel der Forschung zur künstlichen Intelligenz, zu neuen Erkenntnissen beitragen (Williams & Ericsson, 2005). Doch obwohl Experten im Sport seit Jahrzehnten eine extreme Medienpräsenz haben und sie vermutlich die am häufigsten betrachtete Expertengruppen darstellen, sind die für eine solche Expertise benötigten Fähigkeiten nur sehr schwierig zu charakterisieren. Der Gegenstand der Expertiseforschung, die Entwicklung, die verwendeten Methoden sowie die aktuelle Ergebnislage, aber auch die derzeit noch offenen Fragen, sollen im nachfolgenden Kapitel thematisiert werden.

1.2.1 Die verschiedenen Ausprägungsformen von Expertise im Sport

Expertise im Sport setzt sich gemäß Janelle und Hillman (2003) aus unterschiedlichen Aspekten zusammen. Im Gegensatz zu vielen anderen Expertisegruppen, wie zum Beispiel bei

Schachspielern, Musikern oder Mathematikern, spielen bei Experten im Sport die physiologischen Voraussetzungen eine bedeutende Rolle. Diese unterscheiden sich jedoch, wie auch viele der weiteren Aspekte, stark zwischen den Sportarten. So benötigt ein Langstreckenläufer in der Weltspitze eine andere Zusammensetzung von schnell und langsam kontrahierenden Muskelfasern als ein 100 Meter Sprinter. Physiologische Aspekte, wie die beschriebene Zusammensetzung von Muskelfasern, können zwar durch systematisches Training verändert werden (siehe beispielsweise Wilmore & Costill, 1999), jedoch ist das Ausmaß dieser Anpassungsfähigkeit genetisch determiniert (siehe beispielsweise Bouchard et al., 1992).

Ein zweiter wichtiger Aspekt sportlicher Expertise ist die technisch korrekte Ausführung von Bewegungen. Ein hohes Maß an sensomotorischer Koordination und damit an effizienten, automatisierten, fehlerunempfindlichen Bewegungsmustern spielt in vielen Sportarten eine entscheidende Rolle und ist insbesondere durch jahreslanges Training zu beeinflussen (siehe beispielsweise Ericsson & Lehmann, 1996; Starkes, 2000).

Neben den genannten physiologischen und sensomotorischen Aspekten sind bei der Betrachtung von sportlicher Expertise vor allem emotionale und kognitive Fähigkeiten zu berücksichtigen. Zur emotionalen Expertise zählen die emotionale Regulation und die psychologischen Fähigkeiten, zur kognitiven Expertise werden das taktische Wissen sowie ausgeprägte Fähigkeiten im Bereich der Wahrnehmung und dem Entscheidungsverhalten gezählt. Der emotionalen Regulation kommt in vielen Sportarten eine große Bedeutung zu. So wird nach einem frustrierenden ersten Satz im Tennis die Leistungsfähigkeit im darauf folgenden Satz auch durch die Fähigkeit des Spielers im emotionalen Umgang mit diesem Misserfolg determiniert. Ähnliches gilt für die psychologische Komponente der Expertise, die zum Beispiel die Motivation, Zielsetzungsstrategien und die Fähigkeit der sozialen Interaktion beinhaltet. Auch mangelnde Motivation kann einen direkten Einfluss auf die zu erbringende Leistung haben und indirekt andere Komponenten der Expertise negativ beeinflussen, indem mangelnde Motivation das systematische Training zur Verbesserung physiologischer Voraussetzungen beeinträchtigt.

Taktisches Wissen stellt in vielen Sportarten einen bedeutenden Faktor für Expertenleistungen dar. Eine Studie mit Amateur- und Profifußballern konnte zeigen, dass Experten besser dazu in der Lage sind verschiedene taktische Aufstellungen wiederzuerkennen, und das sogar dann, wenn die Spielszenen nicht als Video sondern ausschließlich als farbige, bewegte Punkte auf dunklem Hintergrund präsentiert wurden (Williams et al., 2006). Der Unterschied zwischen Experten und Novizen in solchen Wiedererkennungsaufgaben ist dann sichtbar, wenn die zu

erkennenden Sequenzen realistische Spielszenen und keine zufälligen Anordnungen beinhalten (Allard et al., 1980). Neben dem taktischen Wissen erfordert die Wiedererkennung von Spielsituationen auch ausgeprägte Fähigkeiten im Bereich der Wahrnehmung. Diverse Studien konnten zeigen, dass Experten im Sport besser darin sind auf die relevanten Informationen zu fokussieren, irrelevante Aspekte auszublenden und auf Basis der extrahierten Informationen schneller und genauer auf die Umwelt zu reagieren (für einen Überblick siehe Williams et al., 2011). Dies gilt sowohl für das Erkennen von Mustern, wie bei der zuvor aufgeführten Identifikation von Spielsituationen, als auch für das Beobachten von Bewegungen der eigenen Mit- und Gegenspieler. Insbesondere in Sportarten, in denen die Athleten Entscheidungen unter großem Zeitdruck treffen müssen, nutzen Experten kinematische Informationen der beobachteten Bewegung, um deren Effekt zu antizipieren und rechtzeitig eine angemessene Reaktion vorzubereiten (für eine weiterführende Darstellung von Antizipationsprozessen im Sport siehe Kap. 1.2.4) (für einen Überblick siehe Williams & Ward, 2007).

Gemäß Janelle und Hillman (2003) spielen demnach physiologische, technische, kognitive und emotionale Fähigkeiten eine entscheidende Rolle bei der Ausprägung von Expertise im Sport, wobei sich die unterschiedlichen Faktoren in ihrer Entwicklung gegenseitig beeinflussen können. Ein Ansatz, wie es zu einer solchen Ausprägung von sportlicher Expertise kommt, soll im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

1.2.2 Deliberate Practice

Entgegen der über viele Jahre vorherrschenden Auffassung, dass Expertise im Sport insbesondere genetisch bedingt und damit vorbestimmt ist (Sternberg & Wagner, 1999), konnten zahlreiche Studien innerhalb der vergangenen 30 Jahre zeigen, dass das Erreichen einer hohen Leistungsfähigkeit in einer Sportart nicht allein durch die genetischen Voraussetzungen der Athleten, sondern in erheblichem Maße auch durch deren Trainingsumfang und Trainingsintensität bestimmt wird (Ericsson et al., 1993; Helsen et al. 1998; Simon & Chase, 1973; Starkes et al., 1996). Bereits 1973 ergab eine Studie mit Schachexperten und -anfängern, dass sich ein Leistungsunterschied zwischen den Expertisegruppen beim Wiedererkennen von verschiedenen Konfigurationen von Spielfiguren auf sinnhafte, realistische Konstellationen beschränkt und sich dementsprechend nicht bei zufälligen Mustern zeigte (Simon & Chase, 1973). Die Autoren schlussfolgerten aus diesem Ergebnis, dass die Schachexperten keine Vorteile bezüglich der allgemeinen Gedächtnisleistung hatten und die gleichen Beschränkungen des Kurzzeitgedächtnisses aufwiesen wie die Schachanfänger. Vielmehr konnten die

Experten ihr Schachwissen, das sie über Jahre erworben hatten, nutzen, um aus den bedeutungsvollen Figurkonstellationen sogenannte Chunks zu bilden und ihre Gedächtnisleistung so erheblich zu steigern. Und auch nachfolgende Studien konnten zwischen Experten und Novizen keine Unterschiede hinsichtlich physischer Kapazitäten, wie zum Beispiel der Sehschärfe, der Reaktionszeit oder des Gedächtnisses, zeigen. Die vorhandenen Unterschiede in Bezug auf die Verarbeitung von Information sind demnach auf trainingsbedingte Änderungen zurückzuführen (Baker et al. 2003b; Ericsson 2003).

Wie groß die Bedeutung des Trainingsumfangs und der Trainingsintensität für die Entwicklung von Expertise ist, zeigten Ericsson et al. (1993) in einer Untersuchung mit Violinenexperten. Die Dokumentation des Trainingsalltags ergab, dass sich die hervorragenden Violinisten in ihrer wöchentlichen Übungszeit von den guten und durchschnittlichen unterschieden. Dieser Unterschied bezog sich jedoch nicht gleichermaßen auf alle Trainingsinhalte, sondern insbesondere auf die Trainingsstunden, die die Violinenexperten allein absolvierten. In diesen Trainingseinheiten arbeiteten die Musiker gezielt an spezifischen Aspekten ihrer musikalischen Fähigkeiten, die zuvor von ihren Lehrern als verbesserungswürdig eingestuft worden waren. Diese Ergebnisse unterstützen damit die Theorie der Autoren (Ericsson et al., 1993), dass strukturiertes, zielorientiertes Training mit großen Wiederholungszahlen (sogenanntes *Deliberate Practice*) das entscheidende Instrument zum Erreichen einer hohen Leistungsfähigkeit in einer Disziplin ist. Gemäß der Definition von Ericsson et al. (1993) hat *Deliberate Practice* immer das Ziel, an den derzeitigen Schwächen zu arbeiten und damit ein höheres Leistungsniveau zu erreichen. *Deliberate Practice* erfordert Planung und Rückmeldung von qualifizierten Trainern und ist für den Trainierenden mit hohem Aufwand verbunden. Daher setzt ein solches Training eine hohe Motivation zum Streben nach der eigenen Verbesserung voraus (Ericsson et al., 1993).

Die Bedeutung der Motivation des Trainierenden wird besonders deutlich, wenn man die sogenannte 10-Jahres-Regel betrachtet, die zuerst von Simon und Chase (1973) auf Basis von Beobachtungen im Schach formuliert wurde. Gemäß dieser wird Expertise in einer Domäne erst nach zehn Jahren und etwa 10.000 Trainingsstunden erreicht. Bekräftigt wird diese Annahme unter anderem durch die Ergebnisse der o.g. Untersuchung von Ericsson und Kollegen (1993), die zeigen konnte, dass die besten Violinisten nach etwa zehn Jahren internationales Spitzenniveau erreichten. Bis zu ihrem zwanzigsten Lebensjahr hatten diese über 10.000 Trainingsstunden absolviert, womit sie etwa 2500 Stunden über den als gut bewerteten Violinisten und etwa 8000 Stunden über Pianisten im Amateurbereich lagen. Und auch für andere

Bereiche, wie zum Beispiel die Medizin (Patel & Groen, 1991), die Mathematik (Gustin, 1985) und das Komponieren von Musik (Hayes, 1981) konnte gezeigt werden, dass zehn Jahre nötig sind, um Expertise in der jeweiligen Tätigkeit zu erlangen. Dies gilt ebenso für diverse Sportarten, darunter Schwimmen (Kalinowski, 1985), Tennis (Monsaas, 1985), Ringen (Hodges & Starkes, 1996), Eiskunstlauf (Starkes et al., 1996), Fußball (Helsen et al., 1998; Ward et al., 2004), Feldhockey (Helsen et al., 1998) und Basketball (Baker et al., 2003a). In allen untersuchten Sportarten benötigten die Athleten mindestens zehn Jahre, um nationales und internationales Wettkampfniveau zu erreichen und absolvierten in dieser Zeit mehr Trainingsstunden als Athleten auf niedrigerem Niveau. Dabei waren jedoch die Trainingsinhalte, anhand derer die an internationalen Wettkämpfen teilnehmenden Experten von Athleten auf regionaler Vereinsebene unterschieden werden konnten, von der jeweiligen Sportart abhängig. So konnte für die Sportart Eiskunstlauf bestätigt werden, dass das erreichte Leistungsniveau in Zusammenhang mit der Anzahl an Einzeltrainingsstunden gemäß der Deliberate Practice Theorie von Ericsson und Kollegen (1993) steht (Starkes et al., 1996). Experten aus den Sportarten Fußball (Helsen et al., 1998; Ward et al., 2004), Ringen (Hodges & Starkes) und Feldhockey (Helsen et al., 1998), für die eine Interaktion mit dem Gegner und eigenen Mitspielern von großer Bedeutung ist, wiesen hingegen eine höhere Anzahl an Gruppentrainingsstunden auf. Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass Experten im Sport vor allem in den Trainingsbereichen gesteigerte Umfänge vorweisen, die für die jeweilige Sportart besonders relevant sind (Baker et al., 2003a; David & Baker, 2007; Ward et al. 2004).

Laut Ericsson und Kollegen (1993) bestimmen insbesondere die Quantität und Qualität des Trainings, ob Expertise in der jeweiligen Domäne erreicht wird. Abernethy und Kollegen (2003) teilen diese Auffassung nicht und betonen, dass auch genetische Dispositionen eine wichtige Rolle bei der Adaptation an Trainingsreize spielen. So zeigten Boucharde et al. (1999) beispielsweise, dass die Varianz bei der Anpassung der maximalen Sauerstoffaufnahme bei einem mehrwöchigen Training bis zu 50 % durch genetische Faktoren und damit nicht allein durch Trainingsreize beeinflusst wurde. Die Debatte „nature versus nurture“ (Anlage versus Umwelt) ist auch zum aktuellen Zeitpunkt noch in vollem Gange (siehe zum Beispiel Tucker & Collins (2012) sowie die Antwort darauf von Ericsson (2013)). Unabhängig von deren Ausgang ist jedoch sicher, dass sowohl die genetische Disposition als auch systematisches Training einen Einfluss auf die Entwicklung von Expertise haben. Anhand der Debatte über den Einfluss von genetischer Disposition und Training ist zu erkennen, wie schwierig sich die Untersuchung von Expertise darstellt. Im Folgenden wird mit dem sogenannten Expert Per-

formance Approach ein Ansatz vorgestellt, wie Expertise und deren Entwicklung systematisch untersucht werden kann.

1.2.3 Expert Performance Approach

Um nicht nur die Unterschiede zwischen Experten und Novizen zu beschreiben, sondern auch die Mechanismen zu identifizieren, die Expertenleistungen zu Grunde liegen, sowie die Voraussetzungen zu bestimmen unter denen sich diese Mechanismen entwickeln, ist ein umfassender Ansatz zur Erforschung von Expertise notwendig. Mit dem Expert Performance Approach von Ericsson und Smith wurde 1991 ein solcher Ansatz vorgestellt, der die Voraussetzung für eine detaillierte Untersuchung von Expertiseleistungen schuf und bis heute Anwendung im Bereich der Expertiseforschung findet (Williams & Ericsson 2005). Gemäß diesem Ansatz sind für die umfassende Analyse von Spitzenleistung drei Analyseschritte notwendig. Zu Beginn besteht die Aufgabe darin, die Fähigkeiten, die die Expertise des Athleten ausmachen, zu identifizieren, um dann im zweiten Schritt die Mechanismen zu bestimmen, die solchen Expertenleistungen zu Grunde liegen. Im dritten Schritt gilt es dann die Voraussetzungen und Erfahrungen abzubilden, die bei der Entwicklung dieser Mechanismen und damit bei der Entwicklung der Expertise eine Rolle spielen (Ericsson & Smith, 1991; Ericsson, 2003; Williams & Ericsson, 2005). Die aufgeführten Schritte sollen im Folgenden genauer beschrieben werden sollen.

Feststellen der sportartspezifischen Expertise

Nach Williams und Ericsson (2005) gilt es zu Beginn, die entscheidenden Aspekte der Expertise in der jeweiligen Sportart durch gezielte Beobachtung unter realen Bedingungen festzustellen. Die erste große Herausforderung besteht anschließend darin, diese Aspekte in realitätsnahen, reproduzierbaren Laboruntersuchungen abzubilden, so dass die Leistung möglichst objektiv bewertet werden kann. Dabei ist auf die Reliabilität der Laboraufgabe zu achten, da in diesem ersten Schritt stabile Prozesse gemessen werden sollen, die zuvor über sehr lange Trainingsphasen angeeignet wurden. Neben der Reliabilität spielt insbesondere die Validität eine entscheidende Rolle. Da es sich bei Expertiseleistungen um sehr spezifische, komplexe Prozesse handelt, sind simplifizierte, für die Probanden neuartige Laboraufgaben ungeeignet. Bei letzteren wäre zu befürchten, dass es zu einer Unterschätzung des Experten-Novizen-Unterschieds und damit zu einer Unterschätzung der Leistung der Experten kommt (Farrow & Abernethy, 2003). Zur Untersuchung von perzeptuell-kognitiver Expertise eignet sich dafür

beispielsweise die Präsentation von Videoclips, die Spielszenen aus der jeweiligen Sportart enthalten und von den Athleten eine Antwort bezüglich der zu erwartenden Folgeaktion erfordert. Die Antwort der Probanden kann dabei entweder verbal, durch einen Tastendruck oder auch durch eine realistische Reaktion aus der entsprechenden Sportart erfolgen. Letztere sind durch den Einsatz moderner Techniken, wie der 3D-Bewegungsanalyse und Kraftmessplatten, möglich und gewährleisten in Kombination mit der Videoprojektion auf sehr große Leinwände ein realitätsnahe Untersuchung von Expertise unter Laborbedingungen (Williams et al., 2002).

Identifikation von Mechanismen der Expertise

Wenn die spezifischen Expertiseleistungen der Athleten in Labor- oder auch in Felduntersuchungen bestimmt werden konnten, gilt es nach Williams und Ericsson (2005) im zweiten Schritt, die Mechanismen zu identifizieren, die solche Leistungen von Experten ermöglichen. Dieser zweite Schritt wurde über lange Jahre in der Expertiseforschung zu Gunsten einer ausschließlichen Messung der Leistungsunterschiede zwischen Experten und Novizen vernachlässigt. Jedoch ist die Untersuchung der Mechanismen von zentraler Bedeutung, um Expertiseeffekte nicht nur zu beschreiben, sondern diese auch erklären und im nächsten Schritt vorhersagen zu können (Williams & Ericsson, 2005). Dazu stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die vor, während und nach der Untersuchungsdurchführung angewendet werden können. An dieser Stelle sollen einige von ihnen vorgestellt werden, mit besonderem Augenmerk auf Methoden zur Untersuchung von Mechanismen, die Experten außerordentliche Wahrnehmungs- und insbesondere Antizipationsleistungen ermöglichen.

Mithilfe von sogenannten Okklusionstechniken können die verwendeten Videosequenzen vor der Versuchsdurchführung so manipuliert werden, dass eine Identifikation der für die entsprechende Wahrnehmungsleistung relevanten Informationen möglich ist. Dabei wird zwischen der zeitlichen und der räumlichen Okklusionstechnik unterschieden. Bei der temporalen Okklusionstechnik werden die Videosequenzen der Spielszenen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gestoppt, so dass den Probanden je nach Zeitpunkt der Okklusion eine unterschiedliche Menge an Informationen zur Verfügung steht, um das Ergebnis der Videosequenz vorherzusagen. Bei einer Untersuchung zum Tennisaufschlag waren auf diese Weise beispielsweise nur Informationen über die Ausholbewegung, über die Aushol- und die Schlagbewegung bis zum Schläger-Ball-Kontakt oder über die Aushol- und Schlagbewegung sowie den Ballflug verfügbar (siehe zum Beispiel Farrow & Abernety, 2003). Werden diese Videosequenzen den

Probanden dann in großer Anzahl gezeigt, lässt sich anhand der Leistungen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmen, welche Rolle die Informationen aus den jeweiligen Zeitfenstern für die Expertenleistung spielen und inwiefern sich Experten diesbezüglich von Novizen unterscheiden. Untersuchungen dieser Art zeigen typischerweise, dass Experten bei der Vorhersage von Handlungseffekten im Vergleich zu Novizen auf frühere Informationen zurückgreifen (für einen Überblick siehe Abernethy, 1987; Williams et al. 1999 sowie Kap. 1.2.4). Möchte man zusätzlich untersuchen, welche Informationen innerhalb der vorhandenen Zeit genutzt werden, findet außerdem die räumliche Okklusion Verwendung. Bei dieser Technik werden wichtige Schlüsselinformationen, bei einem Tennisaufschlag zum Beispiel der Schläger oder die Hüfte, verdeckt, so dass diese Informationen von den Probanden nicht genutzt werden können. Kommt es in der Folge im Vergleich zu einer Kontrollbedingung ohne räumliche Okklusion zu einer Verschlechterung der Leistung, kann daraus geschlossen werden, dass die verdeckte Information von den Experten genutzt wird (Müller et al., 2006).

Eine weitere Methode um zu untersuchen welche Informationen der dargebotenen Stimuli von den Experten genutzt werden, ist die sogenannte Point-Light-Technik. Point-Light-Stimuli werden erzeugt, indem reflektierende Marker an den Gelenken angebracht werden und spezielle Kameras anschließend ausschließlich die Bewegung dieser Marker aufzeichnen. Neben der kinematischen Analyse der Bewegungen können diese Daten auch zur Erstellung von sogenannten Point-Light-Displays (PLDs) genutzt werden. Die aufgezeichneten Marker werden dabei zumeist als weiße Punkte auf schwarzem Hintergrund dargestellt. Diese PLDs können genutzt werden, um zu untersuchen, welche Bedeutung kinematische Informationen für die Bewegungswahrnehmung haben (Blake & Shiffrar, 2007). Bereits 1973 konnte Johansson in einer ersten Studie, die zur Untersuchung von menschlichen Bewegungen auf die Point-Light-Methode zurückgriff, zeigen, dass lediglich zehn bis zwölf dieser Leuchtpunkte benötigt werden, um Bewegungen wie Gehen, Rennen und Tanzen erkennen zu können. Weitere Untersuchungen in den Folgejahren ergaben, dass die Darstellung von Bewegungen in PLDs ausreichend ist, um das Geschlecht (Kozlowski & Cutting, 1977; Troje, 2002), die Identität (Cutting & Kozlowski, 1977; Loula et al., 2005), die Mimik (Bassili, 1978) sowie die Emotionen (Clarke et al., 2005) des Akteurs zu identifizieren. Es sind jedoch nicht nur Merkmale wie das Geschlecht oder die Identität, sondern auch die Erwartungen einer Person bei der Ausführung einer Bewegung (Runeson & Frykholm, 1983) sowie der Effekt einer Handlung (Abernethy et al., 2001; Bischoff et al., 2012; Cañal-Bruland et al., 2011a,b; Huys et al., 2009; Mori &

Shamada, 2013; Shim et al., 2005; Ward et al., 2002; Williams et al., 2009), die mithilfe der kinematischen Informationen erkannt werden können. So waren Probanden in der Studie von Runeson & Frykholm (1993) dazu in der Lage anhand der Bewegungstrajektorien anzugeben, ob die beobachteten Personen eine korrekte Information über das Gewicht einer zu hebenden Kisten hatten oder ob sie getäuscht wurden. Aus Studien mit Säuglingen und Kleinkindern resultierte, dass die Fähigkeit Bewegungen in PLDs zu erkennen bereits mit vier Monaten vorhanden (Fox & McDaniel, 1982) und die Erkennensleistung ab dem fünften Lebensjahr mit Erwachsenen vergleichbar ist (Pavlova et al., 2001). Weiterhin ergab eine Untersuchung von Pinto & Shiffrar (2009), dass die Sensitivität für die Wahrnehmung von menschlichen Bewegungen größer ist als für vergleichbare Bewegungen von Tieren. Die Ergebnisse dieser Studien machen deutlich, dass die Wahrnehmung von menschlichen Bewegungen eine besondere Bedeutung im Rahmen der visuellen Wahrnehmung hat und insbesondere auf kinematischen Informationen basiert (Blake & Shiffrar, 2007).

Untersuchungen aus dem Bereich der Expertiseforschung konnten zeigen, dass die Bewegungsinformationen in PLDs für Experten ausreichend sind, um den Effekt einer beobachteten Handlung, wie zum Beispiel die Richtung eines Tennisschlags, zu antizipieren (Abernethy et al., 2001; Cañal-Bruland et al., 2011b; Huys et al., 2009; Williams et al., 2009) sowie, dass keine signifikanten Unterschiede in der Antizipationsleistung zwischen PLDs und normalen Videosequenzen festzustellen sind (Abernethy et al., 2001; Wright et al., 2011). Ein weiterer Vorteil der Point-Light-Darstellung besteht darin, dass einzelne Punkte oder auch ganze Segmente entfernt oder manipuliert werden können. Auf diese Weise ist es möglich, die für die jeweilige Wahrnehmungsaufgabe wichtigen Merkmale zu identifizieren. Beispielsweise ersetzten Williams und Kollegen (2009) einzelne Segmente von Tennisschlägen in die linke Ecke durch die Trajektorie von Schlägen in die rechte Ecke und umgekehrt. Dabei zeigten Experten und Novizen unterschiedliche Wahrnehmungsstrategien (Williams et al., 2009).

Eine Methode, die während der Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Expertisemechanismen eingesetzt wird, ist die Verwendung von Systemen zur Registrierung von Blickbewegungen. Diese sogenannten Eyetracking-Systeme liefern Informationen über Sakkaden, Blickverfolgungen und Fixationen, wobei im Bereich der Expertiseforschung vor allem die Anzahl und Dauer von Fixationen herangezogen wird (Williams et al., 2005). Die Orte von Fixationen geben Aufschluss über die Bereiche, die für die Athleten von Interesse sind. Zusätzlich liefern Dauer und Häufigkeit der Fixationen Hinweise auf die Menge an ver-

wendeten Informationen (Williams et al., 1999). Vergleiche zwischen Experten und Novizen konnten zeigen, dass sich Experten hinsichtlich ihrer Blickstrategien signifikant von weniger erfahrenen Athleten unterscheiden (siehe zum Beispiel Afonso et al., 2012; Singer et al., 1996; Williams et al., 1994; Williams et al., 1998). Das Problem vieler solcher Eyetracking-Studien ist jedoch eine mögliche Diskrepanz zwischen der fixierten und der tatsächlich wahrgenommenen Informationen. So impliziert ein fixiertes Objekt nicht automatisch, dass dieses auch von dessen Beobachter wahrgenommen wird. Genauso ist es möglich, dass zwar ein Objekt fixiert wird, jedoch gleichzeitig mithilfe der peripheren Wahrnehmung Informationen eines anderen Objekts verarbeitet werden (Williams et al., 1999; Williams et al., 2004; Williams & Ericsson, 2005). Um dieses Problem zu adressieren und zwischen fovealer und peripherer Informationsaufnahme zu differenzieren, nutzten Schorer und Kollegen (2013) eine Technik, bei der die Athleten je nach Experimentalbedingung nur Informationen im fovealen, im peripheren oder im gesamten Blickfeld zur Verfügung standen. Bei dieser aufwändigen Videotechnik werden Informationen des Eyetrackers über den Ort der aktuellen Fixation genutzt, um die visuellen Informationen im fovealen oder peripheren Blickfeld in Echtzeit aus dem Stimulationsvideo auszublenden. Die Studie von Schorer et al. (2013) ergab, dass die foveale Wahrnehmung bei einer Antizipationsaufgabe im Volleyball für Experten eine größere Rolle spielt als periphere Aspekte. Jedoch führte keine der beiden Bedingungen allein zu einer Antizipationsleistung, die mit der kombinierten Sichtbedingung vergleichbar war.

Aufgrund der technischen Entwicklung der letzten zwei Jahrzehnte rücken neurowissenschaftliche Untersuchungsmethoden immer mehr in den Fokus der Expertiseforschung (für einen Überblick siehe Yarrow et al., 2009). Diese Methoden bieten erstmals die Möglichkeit zu untersuchen, in welcher Form Expertiseleistungen im Gehirn repräsentiert sind. Zuvor waren Expertiseleistungen im Sport zwar zumeist mit vergleichsweise realitätsnahen, komplexen Aufgaben auf Verhaltensebene untersucht worden, diese ließen jedoch nur bedingt Schlüsse über die zugrundeliegenden neuronalen Prozesse zu. Im Gegensatz dazu wurde die neuronale Basis der lernbedingten Anpassung von Bewegungswahrnehmung und -ausführung in der Regel in neurowissenschaftlichen Studien mit sehr simplifizierten Laboraufgaben aus dem Bereich der klassischen Psychologie untersucht. Anhand dieser klassischen neurowissenschaftlichen Studien konnte jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob solche neuronalen Anpassungseffekte nicht nur für einfache Laboraufgaben verantwortlich sind, die für Stunden oder wenige Tage geübt werden, sondern auch für über Jahre erlernte, sportsspezifische Spitzenleistungen (Yarrow et al., 2009). Aus diesem Grund werden neurowissenschaft-

liche Untersuchungsmethoden, wie die Transkranielle Magnetstimulation (TMS), das Elektroenzephalogramm (EEG) oder die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT), seit einigen Jahren vermehrt eingesetzt, um die neuronalen Unterschiede zwischen Experten und Novizen im Sport zu bestimmen (siehe zum Beispiel Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Bishop et al., 2013; Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Wright et al., 2010, 2011). Weiterhin sollten neurowissenschaftliche Expertiseuntersuchungen die Gültigkeit diskutierter Erklärungsmodelle für Expertiseleistungen, wie zum Beispiel die Verwendung interner Modelle zur Antizipation von Handlungseffekten (Yarrow et al., 2009), überprüfen.

Durch die Anwendung von TMS in Studien mit Tennisexperten und Novizen konnte beispielsweise gezeigt werden, dass sich die beiden Probandengruppen hinsichtlich der Repräsentation ihrer Hände im primären motorischen Kortex (Nielsen & Cohen, 2008) sowie der kortikalen Erregbarkeit unterscheiden (Pearce et al., 2000) und die gesteigerte Erregbarkeit der Tennisexperten nur auf die Sportart Tennis, nicht aber auf die Sportarten Golf und Tischtennis zutrifft (Fourkas et al., 2008). Außerdem wurde TMS während einer Antizipationsaufgabe im Basketball eingesetzt, um die Verwendung der eigenen Repräsentationen des Basketballfreiwurfs zur Antizipation der Effekte von beobachteten Würfeln zu untersuchen (Aglioti et al., 2008). Dabei konnte gezeigt werden, dass Experten bei der Antizipation von Bewegungseffekten anderer Spieler auf Gehirnareale zurückgreifen, die an der eigenen Ausführung dieser Bewegung beteiligt sind. Das EEG ist im Rahmen der Expertiseforschung nach Janelle und Kollegen (2004) vor allem dazu geeignet, die selektive Aufmerksamkeit zu bestimmen, die Probanden für eine Tätigkeit aufbringen müssen. Auch hier konnten Unterschiede zwischen Experten und Novizen gezeigt werden (Radlo et al., 2001). Zur Identifizierung von beteiligten Gehirnarealen sind EEG-Messungen aufgrund der vergleichsweise geringen räumlichen Auflösung jedoch nur bedingt geeignet (Nunez & Srinivasan, 2006).

Eine gute räumliche Auflösung ist hingegen einer der Vorteile der funktionellen Magnetresonanztomographie (Huettel et al., 2008). So kann mit dieser Methode bestimmt werden, welche Gehirnareale während einer Experimentalbedingung im Vergleich zu einer anderen Experimental- oder Kontrollbedingung aktiviert sind und wie sich diese Aktivierung von anderen Experimentalgruppen unterscheidet. Calvo-Merino und Kollegen (2005) verglichen beispielsweise erfahrene Capoeira- und Balletttänzer bei der Beobachtung ihres eigenen und des jeweils fremdem Tanzstils. Die erfahrenen Tänzer waren damit gleichzeitig die unerfahrene Kontrollgruppe im jeweils anderen Tanzstil, für den sie keine ausgeprägte Expertise aufwiesen. In einem Folgeexperiment wurden Balletttänzern dann ausschließlich Videosequen-

zen aus dem Ballett präsentiert, jedoch variierten die Stimuli in Hinblick auf die visuelle und motorische Erfahrung mit den gezeigten Tanzelementen. Auf diese Weise konnte der Einfluss von motorischer und visueller Expertise miteinander verglichen werden (Calvo-Merino et al., 2006). Weiterhin wird die funktionelle Magnetresonanztomographie auch genutzt, um die Frage zu beantworten, welche Gehirnareale an der Antizipation von Handlungseffekten anderer Personen beteiligt sind (Abreu et al., 2012; Wright & Jackson, 2007). Hierzu wird die Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen mit der reinen Beobachtung einer Handlung ohne Antizipationsaufgabe verglichen, um so den Antizipationseffekt möglichst gut zu isolieren. So konnten beispielsweise Abreu und Kollegen (2012) zeigen, dass Areale des AON sowohl bei Basketballexperten, als auch bei Novizen während der Effektantizipation von Basketballfreiwürfen stärker aktiviert sind als bei der Beobachtung von rückwärts abge spielten Freiwurfsequenzen ohne Antizipationsaufgabe.

Der Vergleich von unterschiedlich guten Expertisegruppen bietet zusätzlich die Möglichkeit, expertiseabhängige Unterschiede hinsichtlich der antizipationsbedingten Gehirnaktivierung zu identifizieren, um so Erkenntnisse über die Mechanismen besserer Antizipationsleistungen von Experten zu gewinnen (Bishop et al. 2013; Wright et al., 2010, 2011). Der Vergleich von Tennisexperten mit Fortgeschrittenen und Anfängern in einer Studie von Wright und Kollegen (2010) resultierte in einer stärkeren Aktivierung in Teilen des AON der Experten während der Antizipation von Tennisschlägen. Und auch Bishop et al. (2013) konnten zeigen, dass eine bessere Antizipationsleistung im Sport mit einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON verbunden ist. Leider existieren bisher keine Längsschnittstudien über die Entstehung und Entwicklung der Expertise von Athleten, die neurowissenschaftliche Methoden einsetzen, um die hirnhysiologischen Veränderungen im Verlauf der Entwicklung der Expertise über einen längeren Zeitraum abzubilden und mit Novizen der jeweiligen Sportart zu vergleichen. Studien mit fMRT-Messungen vor und nach einer Trainingsintervention umfassten bisher nur kurze Aneignungsphasen von wenigen Tagen (Cross et al., 2009), die gemäß der Deliberate-Practice-Definition von Ericsson et al. (1993) bei weitem nicht genügen, um den gemessenen Lerneffekt als Ausbildung von Expertise zu bezeichnen.

Ein Nachteil bei der Verwendung dieser neurowissenschaftlichen Methoden zur Untersuchung von Expertiseleistungen besteht darin, dass die motorischen Antwortmöglichkeiten der Athleten aufgrund der methodischen Einschränkungen der eingesetzten Techniken sehr limitiert sind (Mann et al., 2013; Yarrow et al., 2009). Bei fMRT-Studien können beispielsweise Kopfbewegungen von wenigen mm bereits zur Unverwertbarkeit der Daten führen, weshalb

sich diese in der Regel auf verbale Antworten oder Tastendrucke beschränken. Realitätsnahe Reaktionsmöglichkeiten, wie sie in einigen klassischen Expertiseuntersuchungen angewendet werden (siehe zum Beispiel Williams et al., 2002), sind in einem Kernspintomographen nicht möglich. Daher untersuchen diese Studien zumeist die neuronalen Korrelate von Wahrnehmungsleistungen und Entscheidungsprozessen, aber nicht der anschließenden, motorischen Reaktionen der entsprechenden Sportart. Trotz der aufgeführten Einschränkung hinsichtlich der Reaktionsmöglichkeiten stellen neurowissenschaftliche Untersuchungsmethoden eine hervorragende Möglichkeit dar, um wichtige Erkenntnisse über die Mechanismen von Expertiseleistungen zu erhalten, die mit anderen Methoden nicht zu gewinnen wären.

Der Entwicklungsverlauf von Expertise

Nachdem die Mechanismen von Expertiseleistungen im zweiten Schritt des Expert Performance Approach identifiziert wurden, stellt sich im Anschluss die Frage, wie Experten diese Mechanismen über die Jahre erlangen und welche Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen. Gemäß der Deliberate Practice Theorie von Ericsson und Kollegen (1993), die bereits in Abschnitt 1.2.2 erläutert wurde, hängt die Entwicklung von Expertise in erstem Maße nicht von den genetischen Voraussetzungen, sondern von Quantität und Qualität des Trainings ab. Dass die Entwicklung von Expertise nicht allein durch altersbedingte Veränderungen hervorgerufen wird, konnte Abernethy 1988 in einer Studie mit Badmintonexperten und Novizen unterschiedlichen Alters nachweisen. Nur in der Expertengruppe zeigte sich eine mit dem Alter ansteigende Antizipationsleistung, bei den Novizen wurde hingegen kein Unterschied zwischen den verschiedenen Altersgruppen gefunden. Weiterhin wurden die Trainingsbiographien von Experten mit denen von Fortgeschrittenen und Novizen verglichen, um den Einfluss von Trainingsprozessen zu ermitteln (Ericsson et al., 1993). Die Idee hinter diesem Vergleich ist, dass die Unterschiede der Biographien identifiziert werden können, die für die Leistungsunterschiede zwischen den verschiedenen Expertisegruppen verantwortlich sind, um daraus Trainingsempfehlungen ableiten zu können. Nachdem Trainingsempfehlungen erarbeitet wurden, besteht der nächste Schritt darin, diese in Lernstudien auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen (für einen Überblick siehe Ward et al., 2008). Beispielsweise identifizierten Williams et al. (2002) in einer Studie mit Tennisexperten und Hobbyspielern ein effektiveres visuelles Suchverhalten als einen wichtigen Grund für bessere Antizipationsleistungen der Experten und trainierten daraufhin eine weitere Gruppe Hobbyspieler darin, dieses Suchverhalten ebenfalls anzuwenden. Die Trainingsintervention bestand jedoch lediglich aus einem insgesamt 90-minütigen Wahrnehmungstraining, dass zwischen dem Prä- und Posttest durch-

geführt wurde. Im Vergleich zu einer Kontroll- und einer Placebogruppe zeigten die Experimentalgruppen dennoch eine signifikant bessere Antizipationsleistung, und das nicht nur unter Labor- sondern auch unter Feldbedingungen. Diese Studie konnte somit zeigen, dass Novizen auch bei geringem Trainingsumfang von den trainierten Verhaltensweisen der Experten profitieren. Und auch weitere Untersuchungen nutzten die Simulation von realen Situationen im Labor durch Videosequenzen in Kombination mit Instruktionen und einem Wahrnehmungstraining und konnten so einen trainingsinduzierten Lerneffekt nachweisen (Smeeton et al., 2005; Williams et al., 2003). Die Untersuchung von Smeeton et al. (2005) konnte dabei durch das Erzeugen einer Drucksituation während des Transfertests außerdem zeigen, dass der Lerneffekt stabiler gegenüber solchen Störgrößen ist, wenn die Inhalte nicht durch explizite Instruktionen vermittelt wurden, sondern die Probanden diese mithilfe von Hinweisen selbst entdeckten (sogenanntes Guided Discovery Learning). Bisher fehlen jedoch Studien, die den Lernerfolg solcher Trainingsprogramme über einen erheblich längeren Zeitraum ermitteln, somit dem Deliberate Practice Ansatz entsprechen (Ericsson et al., 2003) und weitere ungeklärte Aspekte, wie zum Beispiel die Frage nach dem optimalen Zeitpunkt solcher Trainingsinterventionen im Entwicklungsverlauf, adressieren (Williams et al., 2011).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Untersuchung von Expertise im Sport gemäß dem Expert Performance Approach in drei Schritten erfolgen sollte. Im ersten Schritt besteht die Aufgabe darin, die spezifische Leistung von Experten in reliablen Laboruntersuchungen zu reproduzieren. Konnte die Leistung der Experten bestimmt werden, hat der nächste Schritt das Ziel, die Mechanismen zu ermitteln, die solchen Expertenleistungen zugrunde liegen. Dabei stehen viele verschiedene Methoden, wie zum Beispiel Okklusionstechniken, die Registrierung von Blickbewegungen sowie neurowissenschaftliche Verfahren, zur Verfügung. Um weiterführende Erkenntnisse über die Mechanismen von Expertise im Sport zu gewinnen, ist nach Williams und Ericsson (2005) eine Kombination von verschiedenen Methoden notwendig. Beispiele sind der Einsatz von Eyetrackern in Okklusionsstudien (siehe zum Beispiel Schorer et al., 2013) oder die Verwendung von verschiedenen Antwortbedingungen in fMRT-Studien, die sich hinsichtlich ihrer Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung unterscheiden (siehe zum Beispiel Farrow & Abernethy, 2003). Für eine umfassende Untersuchung von Expertise im Sport sollten im Anschluss die Faktoren identifiziert werden, die für die Entwicklung der Expertise entscheidend sind. Dazu können zum einen Trainingsbiographien untersucht und zum anderen Lernstudien zur Vermittlung der Mechanismen, die zuvor in Schritt zwei bestimmt wurden, eingesetzt werden. Insbesondere dieser letzte Schritt des Expert Performance

Approach spielt für den Transfer der Ergebnisse in die Trainingspraxis eine entscheidende Rolle (Williams et al., 2011). Nachdem in diesem Kapitel die Methoden zur Untersuchung von Expertise im Sport, insbesondere für perzeptuell-kognitive Leistungen, beschrieben wurden, sollen im folgenden Abschnitt nun die Ergebnisse von Studien vorgestellt werden, in denen diese Methoden eingesetzt wurden, um die expertiseabhängigen Unterschiede bei der Antizipation von Handlungseffekten zu untersuchen.

1.2.4 Antizipation im Sport

Viele Studien, die sich mit den Unterschieden zwischen Experten und Novizen im Sport auseinandersetzen, fokussieren sich dabei auf die Leistungsunterschiede bei der Antizipation von Folgeereignissen unter Zeitdruck (Munzert, 1995). Der hohe Anteil an Antizipationsstudien in der Expertiseforschung hat im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen spielt die Vorhersage von Handlungseffekten in vielen Sportarten eine wichtige Rolle. Insbesondere in Disziplinen, in denen die Athleten unter großem Zeitdruck auf Aktionen ihrer Mit- und Gegenspieler reagieren müssen, ist die Vorhersage des Handlungseffekts anderer Athleten ein leistungsbestimmender Faktor. So muss sich der Returnspieler im Tennis bereits für eine angemessene Reaktion entscheiden bevor der Schläger des aufschlagenden Spielers den Ball trifft, da er sonst nicht genügend Zeit hätte, um seine Reaktion rechtzeitig auszuführen (Williams et al., 2011). Durch den enormen Anstieg der Aufschlaggeschwindigkeiten auf teilweise über 230 km/h hat die Antizipationsfähigkeit im Spitzentennis innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte zusätzlich noch an Bedeutung gewonnen. Und auch in vielen anderen Spiel- und Kampfsportarten, wie zum Beispiel dem Fußball oder dem Karate, stehen die Athleten bei ihren Entscheidungen unter großem zeitlichen Druck und müssen daher die Effekte der Handlungen ihrer Gegner vorhersagen, bevor diese die Handlung tatsächlich ausführen. Zum anderen kann die Antizipationsfähigkeit von Experten sehr gut mit den zur Verfügung stehenden Methoden untersucht und sowohl in Feld- als auch in Laboruntersuchungen reliabel abgebildet werden.

Antizipation anhand von kinematischen Informationen

Bereits 1987 konnten Abernethy und Russell in einer Studie mit Badmintonexperten und Novizen zeigen, dass Experten besser dazu in der Lage sind, die Richtung des beobachteten Schlags vorherzusagen. Der Leistungsunterschied zwischen den beiden Expertisegruppen zeigte sich dabei vor allem dann, wenn die Videos gemäß dem temporalen Okklusionsparadigma zu Zeitpunkten gestoppt wurden, die vor dem Schläger-Ball-Kontakt lagen und somit

keine Informationen über den Ballflug enthielten. Die Probanden konnten in diesen Bedingungen demnach ausschließlich auf Informationen zurückgreifen, die durch die Bewegung des beobachteten Badmintonspielers übermittelt wurde. Die gleichzeitige Verwendung einer räumlichen Okklusionstechnik lieferte außerdem einen Hinweis darauf, dass die Entscheidung der Experten im Vergleich zu den Novizen nicht nur auf der Bewegung des Schlägers basierte, sondern auch auf Informationen, die durch die Bewegung des Schlagarms vermittelt wurden.

Dass Experten besser als Novizen dazu in der Lage sind, die Effekte von Handlungen anderer Spieler zu antizipieren, konnte unter anderem auch für die Sportarten Squash (Abernethy, 1990; Abernethy et al., 2001), Volleyball (Schorer et al., 2013; Starkes et al., 1995), Beachvolleyball (Cañal-Bruland et al., 2011a), Baseball (Paull & Glencross, 1997), Tennis (Cañal-Bruland et al., 2011b; Farrow & Abernethy, 2003; Huys et al., 2009; Ward et al., 2002; Williams et al., 2009; Williams et al., 2002), Cricket (Müller et al., 2006; Müller et al., 2009), Basketball (Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Wu et al., 2013) und Fußball (Bishop et al., 2013; Roca et al., 2011; Savelberg et al., 2002) gezeigt werden. Auch bei diesen Untersuchungen war der Effekt der Handlung, im Fall der genannten Studien die Flugkurve des Balls, für die Probanden nicht sichtbar, so dass auch diese Ergebnisse dafür sprechen, dass die Experten bei der Effektantizipation auf kinematische Informationen zurückgreifen. Besondere Unterstützung erhält diese Theorie durch die Ergebnisse der Studie von Abernethy und Kollegen (2001) mit Squashexperten und Novizen, in der die Stimuluspräsentation entweder durch normale Video- oder durch Point-Light-Sequenzen erfolgte. Dabei zeigte sich der expertiseabhängige Leistungsunterschied in der Antizipationsleistung unabhängig davon, ob die beobachtete Bewegung durch die Point-Light-Darstellung auf die kinematischen Informationen reduziert wurde. Die Ergebnisse konnten von Wright et al. (2011) in einer Studie mit Badmintonspielern bestätigt werden. Auch in dieser Untersuchung hatte die Darstellung der Stimuli als PLDs keinen Einfluss auf die Antizipationsleistung.

Der Einfluss verschiedener Antwortbedingungen auf die Antizipation

Betrachtet man die diversen Studien in der Expertiseliteratur, dann fällt auf, dass die Teilnehmer bei einem Großteil der Studien zur Untersuchung der Antizipationsfähigkeit mit der Aufgabe konfrontiert wurden, die Richtung oder Flugkurve des Spielobjekts zu antizipieren und die Einschätzung in Form einer verbalen Antwort oder eines Tastendrucks abzugeben. Das experimentelle Antwortverhalten entspricht somit nicht der Reaktion auf die beobachtete

Handlung, die eine reale Ausführung der Sportart von dem Athleten erfordert (Williams et al., 1999). Um zu untersuchen, ob der Leistungsunterschied bei der Effektantizipation zwischen Experten und Novizen nicht nur in vereinfachten Laboraufgaben, sondern auch bei der Antizipation unter realistischen Bedingungen zu beobachten ist, führten Williams und Kollegen (2002) eine Untersuchung durch, in der die Athleten mit einer sportspezifischen Bewegung auf Videosequenzen in Lebensgröße reagieren mussten. Die Videosequenzen wurden gestoppt, sobald die Probanden ihre Reaktion ausführten. Dabei zeigte sich, dass die Experten ihre Reaktion bei gleicher Quote korrekter Antworten im Durchschnitt 140 ms früher initiierten als die Novizen. Abernethy et al. (2001) konnten mithilfe einer Brille, die innerhalb von 4 ms abgedunkelt werden konnte und von den Probanden auf dem Squashfeld getragen wurde, zeigen, dass der Expertiseunterschied in der Antizipationsleistung erhalten blieb, wenn die Athleten nicht mit einer Stifteingabe auf Videosequenzen reagierten, sondern mit sportartspezifischen Bewegungen auf reale Spielsituationen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor dem Ball-Schläger-Kontakt abgedunkelt wurden. Eine Studie mit Baseballexperten, Baseballschiedsrichtern und Novizen von Cañal-Bruland et al. (2012) ergab ebenfalls, dass die Baseballexperten signifikant bessere Antizipationsleistungen als die anderen beiden Probandengruppen zeigten, unabhängig davon, ob sie die Antwort in Form einer verbalen oder einer realen, sportartspezifischen Reaktion gaben. Diese Ergebnisse zeigen, dass Experten auch unter realistischen Bedingungen die Effekte von beobachteten Handlungen besser antizipieren als Novizen.

Einige Autoren gehen davon aus, dass ein Tastendruck oder eine verbale Reaktion als Antwort auf eine Antizipationsaufgabe insbesondere für Experten eine künstliche Situation darstellt (Abernethy et al., 1993; Abernethy et al., 2001; Farrow & Abernethy, 2003; Williams et al., 1999; Williams et al., 2002). Dementsprechend ist von einer geringeren Kopplung zwischen der wahrgenommenen und der eigenen Handlung auszugehen, was nach Ansicht von Gibson (1979) jedoch einen wichtigen Faktor der Wahrnehmungsexpertise darstellt. Um die Frage nach dem Einfluss der Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung zu beantworten, sind Studien notwendig, die ausschließlich die Art der Antwort variieren. Ein Experiment von Adam et al. (1996) mit einfachen Wahlreaktionsaufgaben konnte beispielsweise zeigen, dass eine natürliche Antwort auf einen Stimulus im Vergleich zu künstlichen Antworten zu einer kürzeren Reaktionszeit und einer verminderten Anzahl fehlerhafter Antworten führte. In einer Untersuchung von Farrow und Abernethy (2003), die sowohl verschiedene Antwortbedingungen als auch unterschiedliche Expertiseniveaus berücksichtigte, führte die Bedingung mit

einer natürlichen Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung (reale Schlagbewegung anstatt einer verbalen Antwort) bei einigen Okklusionszeitpunkten zu einer besseren Antizipation der Schlagrichtung von Tennisaufschlägen. Dies galt insbesondere für die Expertengruppe, was die Autoren zu dem Schluss brachte, dass die Unterschiede in der Antizipationsleistung zwischen Experten und Novizen unter nicht natürlichen Antwortbedingungen und somit einer geringen Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung unterschätzt werden könnten. Ein weiterer Hinweis auf die große Bedeutung realitätsnaher Stimuli und sportartspezifischer Antwortbedingungen kommt von einer Metaanalyse, die den Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Ergebnisse von Studien zur Untersuchung der Entscheidungsfähigkeiten von Experten und Novizen identifiziert hat (Travassos et al., 2013). Diese Metaanalyse von 31 Zeitschriftenbeiträgen ergab, dass die Zeit bis zur Entscheidung sowie die Anzahl korrekter Antworten von der Antwortart und dem Stimulusformat beeinflusst wurden. Der Unterschied zwischen Experten und Novizen wurde dann am besten abgebildet, wenn die Athleten sportartspezifische Antworten in der natürlichen Umgebung der jeweiligen Sportart gaben.

Transfer der Antizipationsfähigkeit

Die beschriebenen Ergebnisse zur besseren Antizipationsfähigkeit von Experten werfen zudem die Frage auf, ob dieser Leistungsunterschied ausschließlich für die jeweilige Expertise-sportart besteht oder ob Experten ihre Antizipationsleistung auch auf andere Sportarten transferieren können (Williams et al., 2011). Bisher existieren Studien zur Untersuchung des Transfers von Wahrnehmungsleistungen jedoch fast ausschließlich für das Erkennen von Spielsituationen (Abernethy et al., 2005; Smeeton et al., 2004). So konnten Smeeton und Kollegen (2004) in einer Studie zum Wiedererkennen von Spielsituationen mit Fußball-, Hockey- und Volleyballexperten zeigen, dass die Fußball- und Hockeyexperten auch in der jeweils anderen Sportart von ihrer Expertise profitierten, nicht jedoch im Volleyball, das sich hinsichtlich der Spielidee sowie der taktischen Aspekte erheblich von den anderen beiden Sportarten unterscheidet. Umgekehrt waren die Volleyballexperten nicht in der Lage, ihre Wahrnehmungsexpertise auf die anderen beiden Sportarten zu transferieren. Die Autoren sind daher der Ansicht, dass der Transfer der Expertise in Bezug auf das Wiedererkennen von Spielsituation möglich ist, wenn es sich um strukturell ähnliche Sportarten, wie zum Beispiel Fußball und Feldhockey, handelt. Abernethy et al. (2005) fanden hingegen einen Transfer der Fähigkeit zum Wiedererkennen von Spielsituationen unabhängig von der Sportart der Experten und führten diesen auf die vielfältigen Erfahrungen der Experten zu Beginn der sportlichen Karriere zurück. Schorer (2007) verglich in seiner Untersuchung erfahrene Handballtor-

hüter, Fortgeschrittene und Novizen während der Vorhersage von Handballsiebenmetern mit Hockeysiebenmetern. Wie erwartet zeigten die Handballtorhüter im Vergleich zu den anderen beiden Probandengruppen eine signifikant bessere Antizipationsleistung während der Vorhersage der Handballsiebenmeter. Bei der Antizipation in der für sie fremden Sportart unterschieden sich die Handballexperten hingegen weder in Bezug auf die Anzahl der korrekten Antworten, noch in Bezug auf die Reaktionszeit von den Fortgeschrittenen und den Novizen. Der Autor kam daher zu dem Ergebnis, dass die Experten nicht in der Lage waren ihre Expertise in Bezug auf die Vorhersage von Handlungseffekten auf eine andere von ihnen nicht beherrschte Sportart zu transferieren. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die verglichenen Sportarten hinsichtlich der gezeigten Bewegungsausführung stark unterschieden. Ob ein Transfer der Antizipation von Handlungseffekten zwischen verschiedenen Sportarten unter anderen Bedingungen dennoch zu beobachten ist, bleibt zu klären (Rosalie & Müller, 2012).

Erklärungsansätze für Expertiseunterschiede bei der Antizipation

Wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben, gibt es zahlreiche Studien, die eine bessere Antizipationsleistung von Experten im Vergleich zu Novizen dokumentieren konnten. Dennoch gibt es nur wenige überzeugende theoretische Begründungen, wie der expertisebedingte Leistungsunterschied zustande kommt. Der Expert-Performance-Approach zeigt zwar an verschiedenen Beispielen, dass bedeutsame Informationen von Experten sehr früh verarbeitet werden und führt dies auf gezieltes Training (sogenanntes Deliberate Practice, siehe Kap. 1.2.2) (Ericsson et al., 1993) und damit verbundene Gedächtnisprozesse zurück (Ericsson & Lehmann, 1996); vor allem für den Bereich der Motorik wird aber nicht weiter spezifiziert, worin die Veränderungsprozesse im Gedächtnis genau bestehen könnten. Eine Ausnahme bilden die Untersuchungen, die unterschiedliche Wahrnehmungsprozesse für Experten und Novizen nachweisen konnten (Cañal-Bruland et al., 2011b; Huys et al., 2009; Singer et al., 1996; Ward et al., 2002; Williams et al., 2002; Williams et al., 2009). Zunächst wurden Systeme zur Registrierung der Blickbewegungen eingesetzt, um die Unterschiede in den Wahrnehmungsstrategien von Experten und Novizen zu beleuchten. Eine Studie im Tennis von Ward und Kollegen (2002) konnte zeigen, dass Tennisexperten nicht nur die Bewegung des Schlägers fixieren, wie dies bei Novizen der Fall ist, sondern zusätzlich vor allem auch die Bewegungen proximaler Merkmale, wie zum Beispiel der Hüfte. Auch Williams und Kollegen (2002) untersuchten die Vorhersage von Tennisschlägen und kamen zu dem Ergebnis, dass die besseren Antizipationsleistungen der Experten im Vergleich zu den Novizen mit

häufigeren Fixationen der Hüft- und Schulterregion und selteneren Fixationen des Schlägers assoziiert waren. Die Aussagekraft dieser Studien ist jedoch begrenzt, da von der Fixation einer Region nicht direkt auf die Verwendung der Information des fixierten Areals geschlossen werden kann (Williams et al., 1999; Williams et al., 2004; Williams & Ericsson, 2005).

Aus diesem Grund hat die Arbeitsgruppe um Mark Williams den Ansatz zur Untersuchung der Wahrnehmungsprozesse methodisch erweitert, indem sie die dynamischen Informationen, die durch die Bewegung vermittelt werden, manipulierten (Cañal-Bruland et al., 2011b; Huys et al., 2009; Williams et al., 2009). Dazu kamen Tennisstimuli in Form von PLDs zum Einsatz, da diese Darstellungsvariante hervorragende Möglichkeiten zur Manipulation der Kinematik bietet, die mit herkömmlichen Videosequenzen auf diese Weise nicht möglich wäre. In Okklusionsstudien konnten zuvor zwar auch einzelne Informationen mithilfe einer Überblendung entfernt werden, allerdings war eine Ablenkung der Probanden durch die auffälligen Überblendungen nicht auszuschließen. Die Manipulation der PLDs umfasste die Okklusion (Huys et al., 2009), die Neutralisierung (Huys et al., 2009) oder den Austausch einzelner Informationspunkte (Cañal-Bruland et al., 2011b; Williams et al., 2009), die zum Beispiel die Hüfte repräsentierten. Der Austausch erfolgte, indem die Trajektorie der entsprechenden Punkte durch die Trajektorie eines Schlags in die jeweils andere Ecke des Feldes ersetzt wurde. So entsprach beispielsweise die Trajektorie des Handgelenks einem Longlineschlag, die restlichen Punkte aber einem Diagonalschlag (Williams et al., 2009). Durch Veränderungen der Antizipationsleistung infolge der gezielten Manipulation ausgewählter Informationen konnte dann ein direkter Einfluss der jeweiligen Informationsquelle aufgezeigt werden. In der Studie von Williams et al. (2009) führte bei den Novizen lediglich der Austausch von Informationen über die Arm- und Schlägerbewegung zu einer Verschlechterung der Antizipationsleistung, bei den Experten hatte hingegen auch die Veränderung der Bein-, Hüft- und Schulterbewegung einen negativen Einfluss. Das gleiche Ergebnismuster fanden auch Huys und Kollegen (2009), als sie in ihrer Studie die Bewegungsinformationen nicht durch Trajektorien von Schlägen in die entgegengesetzte Richtung austauschten, sondern durch neutrale Trajektorien, die keine Informationen über die Schlagrichtungen enthielten. Die Ergebnisse dieser beiden Studien zeigen, dass die Antizipation der Schlagrichtung von Tennisschlägen bei Experten auf Informationen von verschiedenen Körperregionen basiert, Novizen hingegen lediglich die Hinweise einer einzelnen Region nutzen. Williams et al. (2009) sowie Huys et al. (2009) interpretieren die Ergebnisse als Hinweis darauf, dass Novizen bei der Antizipation von Handlungseffekten eine lokale, Experten hingegen eine globalere Wahrnehmungsstrate-

gie nutzen. Experten können durch eine globalere Wahrnehmungsstrategie im Tennis nicht nur die erst kurz vor dem Ball-Schläger-Treffpunkt verfügbaren Informationen der Arm- und Schlägerbewegung nutzen, sondern auch früher verfügbare Informationen, wie zum Beispiel die Fußstellung (Williams et al., 2009). Weiterhin vermuten Williams und Kollegen (2009), dass Experten aufgrund ihrer Wahrnehmungsstrategie für Täuschungen weniger anfällig sind, da ihre Entscheidung auf verschiedenen Informationen beruht. Die Unterscheidung zwischen einer lokalen und einer globalen Informationsaufnahme wird auch von Studien beschrieben, die sich mit der Wahrnehmung von Objekten (Watanabe & Kituchi, 2006) und Bewegungen (Chang & Troje, 2009; Troje, 2008) befassen. Chang und Troje (2009) trennen zwischen einer angeborenen Wahrnehmung lokaler Aspekte einer Bewegung und einer erlernten Wahrnehmung des globalen Bewegungsmusters. Die Autoren beschreiben die globale Wahrnehmung weiterhin ebenfalls als expertiseabhängig und vermuten, dass diesen beiden Wahrnehmungsstrategien auch unterschiedliche neuronale Mechanismen zugrunde liegen. Auf Basis der beschriebenen Ergebnisse können jedoch keine Aussagen darüber getroffen werden, inwiefern sich die neuronalen Prozesse dieser beiden Wahrnehmungsstrategien tatsächlich unterscheiden und worin diese Unterschiede bestehen. Außerdem fehlt bisher ein Erklärungsansatz, in welcher Form die Informationen aus einer möglicherweise globaleren Wahrnehmungsstrategie genutzt werden und in welchem Zusammenhang diese mit der besseren Antizipationsleistung von Experten steht.

Ein weiterer Erklärungsansatz für den expertisebedingten Leistungsunterschied bei der Antizipation von Handlungseffekten geht davon aus, dass die zu antizipierende Bewegung im Gehirn des Beobachters intern simuliert wird, um durch das Ergebnis dieser Simulation auf den Effekt der Handlung zu schließen (Bishop et al., 2013; Diersch et al., 2013; Gazzola & Keysers, 2009; Wright et al., 2010; Yarrow et al., 2009). Dabei werden insbesondere die Gehirnareale genutzt, die während der eigenen Ausführung dieser Bewegungen daran beteiligt sind, die sensorischen Konsequenzen der Bewegungsausführung vorherzusagen (Aglioti et al., 2008; Miall, 2003; Yarrow et al., 2009). So konnte eine Studie von Aglioti und Kollegen (2008) mit Basketballexperten, visuell erfahrenen Basketballjournalisten und -trainern sowie Novizen zeigen, dass die Basketballspieler mit motorischer Expertise im Vergleich zu den beiden anderen Probandengruppen signifikant besser dazu in der Lage waren das Ergebnis von Freiwürfen zu antizipieren. Außerdem kam es bei den Basketballexperten während der Antizipation zu einer spezifischen Steigerung der Erregbarkeit in Arealen der Repräsentation der Handmuskulatur, die auch an der Ausführung von Freiwürfen involviert ist. Cañal-

Bruland und Kollegen (2012) konnten ebenfalls zeigen, dass Baseballexperten mit einer ausgeprägten motorischen Expertise bessere Antizipationsleistungen erbrachten als lediglich visuell erfahrene Schiedsrichter und als unerfahrene Novizen. Der beschriebene Erklärungsansatz geht davon aus, dass Experten bei der Antizipation von Handlungseffekten auf die Repräsentationen zurückgreifen, die sie auch zur Ausführung ihrer eigenen Bewegungen nutzen und die sie durch jahreslanges Training erworben und verfeinert haben. Für detailliertere Informationen zu diesem Ansatz siehe Kapitel 1.3.2.

Wie in diesem Kapitel deutlich wurde, spielen überdurchschnittliche Wahrnehmungsfähigkeiten, insbesondere in Bezug auf die Wahrnehmung von Bewegungen anderer Personen, eine große Rolle für die Antizipationsleistungen von Experten. In der Expertiseforschung existieren bisher jedoch nur wenige Erkenntnisse darüber, welche Verarbeitungsprozesse solchen Vorhersageleistungen zugrunde liegen. In beiden Studien der vorliegenden Arbeit wurde daher die funktionelle Magnetresonanztomographie genutzt, um die Unterschiede in der neuronalen Aktivität zwischen Experten und Novizen bei der Antizipation von Handlungseffekten zu bestimmen und die Spezifität der Expertise sowie den Einfluss von verschiedenen Antwortbedingungen zu ermitteln. Für die Untersuchung der Mechanismen, die expertisebedingten Unterschieden in der Antizipationsleistung zugrunde liegen, ist es wichtig zunächst grundlegende Aspekte der Wahrnehmung von menschlichen Bewegungen zu betrachten. Dies soll im nachfolgenden Abschnitt geschehen.

1.3 Die gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung

Um angemessen auf die Handlungen anderer Menschen zu reagieren, besteht eine wichtige Voraussetzung darin, die Bewegungen wahrzunehmen und das Ziel der Handlung zu identifizieren. In vielen Situationen ist der Akteur erst dann in der Lage, sich für eine passende Antwort zu entscheiden, wenn ihm die Intention seines Gegenübers bekannt ist. So wird sich beispielsweise ein Abwehrspieler im Fußball erst dann für eine Bewegung zur Verteidigung entscheiden, wenn er sicher zu wissen glaubt, ob es sich bei der Bewegung des Stürmers um eine Täuschung oder eine tatsächliche Richtungsveränderung handelt. Die Ergebnisse der in Kapitel 1.2.3 beschriebenen Point-Light-Studien konnten zeigen, dass die Wahrnehmung von menschlichen Bewegungen eine besondere Bedeutung im Rahmen der visuellen Wahrnehmung hat und insbesondere auf kinematischen Informationen basiert (Blake & Shiffrar, 2007). Dies führt zu der Frage, was der Ursprung dieser besonderen Sensitivität für die Wahrnehmung von menschlichen Bewegungen ist. Im Folgenden sollen daher nun Theorien vorgestellt

werden, die auf Ergebnisse von Verhaltensexperimenten sowie computationale Modelle zurückgreifen, um den Zusammenhang von Wahrnehmung und Handlung zu diskutieren.

1.3.1 Die Common-Coding Theorie

Ein von Prinz (1997) und Hommel et al. (2001) postulierter Erklärungsansatz geht davon aus, dass die Fähigkeit, die Bewegungen von anderen Personen wahrzunehmen, insbesondere aus den eigenen langjährigen motorischen Erfahrungen resultiert. Entgegen der bis dahin vorherrschenden Theorie, dass Wahrnehmung und Handlung zwei getrennt voneinander ablaufende Prozesse sind, die zur Reaktion auf einen Stimulus einen Transfer zwischen diesen beiden Kanälen benötigen (Welford, 1968), geht der Common-Coding Ansatz von Prinz (1997) von einer, zumindest teilweise, gemeinsamen Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung aus. Durch diese Überlappung von sensorischen Repräsentationen der Bewegungswahrnehmung und motorischen Repräsentationen der Handlungsplanung ist ein Transfer nicht notwendig und motorische Vorerfahrungen können für die Wahrnehmung von Bewegungen genutzt werden (Prinz, 1997).

Um die gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung aufzuzeigen, analysierte Prinz (1997) die Ergebnisse von Induktions- und Interferenzexperimenten, in denen die Probanden Handlungen ausführen mussten, die Repräsentationen mit gleichzeitig wahrzunehmenden Handlungen teilten. Beispielsweise erzeugte Müsseler in seiner Studie von 1995 eine Interferenz, indem Probanden während der Planung und Ausführung einer zu drückenden Tastensequenz eine weitere Handlung präsentiert wurde, die entweder in die gleiche oder in eine andere Richtung erfolgte. Stimmt die beobachtete Richtung mit der geplanten Ausführung überein, kam es zur Interferenz beider Prozesse und dementsprechend zu einer schlechteren Leistung der Probanden. In einer Serie von Induktionsexperimenten von Hommel (1990, 1993) hatten Probanden die Aufgabe mit Tastendrücken auf hohe und tiefe Töne zu reagieren, die von links oder von rechts kamen. Dabei zeigte sich, dass die Leistung der Probanden höher war, wenn die Seite des korrekten Tastendrucks der Seite des abgespielten Tons entsprach (sog. Simon Effekt) und Wahrnehmung und Handlung somit eine gemeinsame Repräsentation der Seite aufwiesen. Im Unterschied zu der Interferenzstudie von Müsseler (1995) erfolgte die Wahrnehmung direkt vor der Planung der eigenen Handlung und nicht während der Handlungsplanung. Hommel et al. (2001) gehen davon aus, dass der gleichzeitige Zugriff auf eine gemeinsame Repräsentation einer Handlung zu Beginn der Handlungsplanung zu einer Induktion (sog. Priming) und im späteren Verlauf zu einer Interferenz führt, da die jeweilige

Repräsentation nicht mehr gleichzeitig für einen zweiten Prozess zur Verfügung steht. In einem Folgeexperiment, das das Design der Studien zum Simon Effekt erweiterte, stimmte dann entweder erneut die Seite des Tastendrucks mit der Seite des Tons überein, oder aber der Effekt des Tastendrucks (Aufleuchten eines Lichts, jeweils entgegengesetzt zur Seite des Tastendrucks). Die Probanden zeigten dabei eine bessere Leistung, wenn die Seite des Handlungseffekts mit der Seite des Tons übereinstimmte. Die Untersuchung lieferte somit einen Hinweis darauf, dass Handlungen in Form des Effekts repräsentiert werden. Dies ist für Hommel und Kollegen (2001) die Grundlage für eine gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung und führte sie zur Formulierung der Theory of Event Coding. Nach dieser sind sowohl auszuführende Handlungen, als auch zu beobachtende Ereignisse in Form von distalen Events und nicht in Form von sensorischen oder muskulären proximalen Informationen repräsentiert. Die Events entsprechen dabei den wahrnehmbaren Konsequenzen einer Handlung. Die Theory of Event Coding beschränkt sich bei der gemeinsamen Repräsentation von wahrgenommenen und ausgeführten Handlungen gemäß Hommel et al. (2001) auf die „späten“ kognitiven Aspekte der Verarbeitung des Wahrgenommenen sowie die „frühen“ kognitiven Aspekte der Planung der Handlungsausführung, wie zum Beispiel die Auswahl eines Handlungsplans auf Basis des erwünschten Effekts, und beschreibt demnach nicht den Zusammenhang zwischen „frühen“ Prozessen der visuellen Wahrnehmung und „späten“ Prozessen der Kontrolle und Koordination von ausgeführten Bewegungen.

Die Annahme von Hommel und Kollegen (2001), dass Handlungen in Form der wahrnehmbaren Effekte repräsentiert sind, beruht auf der ideomotorischen Theorie, nach der die Ausführung einer Handlung von der Intention des Akteurs initiiert wird und nicht, wie vom sensorischen Ansatz angenommen, von einem externen Stimulus. Die Intention entspricht dabei dem Effekt, den der Akteur mit seiner Handlung erzielen möchte. Bereits die ideomotorische Theorie ging daher davon aus, dass Handlungen in Form dieser wahrnehmbaren, distalen Handlungseffekte repräsentiert sind (Greenwald, 1970; Prinz, 1997). Wenn Handlungen als Effekt repräsentiert sind, ist es elementar, dass der Zusammenhang zwischen Handlungen und den Effekten erlernt wurde (Hommel, 2003). Denn nur wenn der Zusammenhang zwischen einer ausgeführten Handlung und dem daraus resultierenden Effekt in der Umwelt bekannt ist, kann diese Verbindung genutzt werden, um auf Basis des intendierten Effekts eine Handlung auszuwählen, die zu dem gewünschten Ergebnis führt (Hommel et al., 2001). Diese Zusammenhänge sind jedoch nicht von Geburt an vorhanden und müssen demnach im Laufe der Entwicklung erworben werden (Hommel, 2003). So führen Säuglinge Handlungen zunächst

zufällig aus, ohne deren Effekt zu kennen. Durch die wiederholte Ausführung können sie die Handlung aber mit dem Effekt in der Umwelt in Verbindung setzen und erlernen auf diese Weise, welche Handlung sie ausführen müssen, um einen bestimmten Effekt zu erzielen. Für diesen Lernprozess müssen nach Prinz (1997) die körperbezogenen Konsequenzen (Reafferenzen), die durch die Ausführung einer Bewegung entstehen, mit den umweltbezogenen Effekten einer Handlung, wie zum Beispiel das Aufleuchten einer Glühbirne nach dem Drücken des Lichtschalters, verknüpft werden. Eine zweite wichtige Voraussetzung für den Lernprozess ist, dass die erworbene Verknüpfung von eigener Handlung und deren Effekt auch umgekehrt genutzt werden kann. Nur so ist der Akteur in der Lage anhand des gewünschten Effekts zu antizipieren, welche Handlung er ausführen muss, um diesen zu realisieren (Hommel; 2003; Iacoboni, 2009; Prinz, 1997). Hinweise darauf, dass die Verbindung von Handlung und Effekt in beide Richtungen genutzt wird und die Verknüpfung zwischen beiden automatisch erfolgen kann, lieferte eine Studie von Hommel (1996). In dieser wurden zunächst irrelevante Töne als Effekt auf einen Tastendruck präsentiert, die im zweiten Teil des Experiments dann vor dem Tastendruck abgespielt wurden, was zu einem Priming der Bewegungsausführung führte. Während dem Wahrnehmen von Handlungen kann der erlernte Zusammenhang zwischen Handlung und Effekt hingegen genutzt werden, um den Effekt der beobachteten Bewegung vorherzusagen (Prinz, 2006; siehe Kap. 1.3.2).

Sollten die Ausführung und die Wahrnehmung von Handlungen auf eine gemeinsame Repräsentation zurückgreifen, ist zu erwarten, dass die Handlungswahrnehmung des Beobachters beeinflusst wird, wenn dieser simultan ebenfalls eine Handlung ausführt (Blake & Shiffrar, 2007; Prinz, 1997). Dieser Effekt konnte in diversen Studien nachgewiesen werden (Jacobs & Shiffrar, 2005; Hamilton et al., 2004; Reed & Farah, 1995). Beispielsweise konnten Jacobs und Shiffrar (2005) zeigen, dass die Leistung bei der Bewertung von Geschwindigkeiten beobachteter Läufer davon abhängt, ob die Beobachter selbst stillstehen oder ebenfalls laufen. Weiterhin sollte bei einer gemeinsamen Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung die Sensitivität bei der Handlungsbeobachtung durch die eigene motorische Vorerfahrung beeinflusst werden. Demnach ist zu erwarten, dass die Sensitivität dann besonders hoch ist, wenn der Beobachter für die beobachtete Handlung eine ausgeprägte Vorerfahrung aufweist. Diese Erwartung wurde beispielsweise von Loula und Kollegen (2005) bestätigt, indem sie zeigen konnten, dass Probanden bei der Identifikation von Personen eine bessere Erkennensleistung aufweisen, wenn es sich um Bewegungen der eigenen Person handelt. Und auch Knoblich und Flach manipulierten in ihrer Studie von 2001 die Passung zwischen beobachteter Handlung

und den eigenen motorischen Repräsentationen, indem sie den Probanden sowohl Videos von sich als auch von anderen Personen präsentierten. Dabei zeigten die Probanden eine bessere Leistung bei der Antizipation eigener Dartwürfe im Vergleich zur Vorhersage fremder Würfe. In einer Studie von Bischoff und Kollegen (2012) mussten Probanden ebenfalls die Effekte eigener und fremder Bewegungen vorhersagen. Die Aufgabe bestand darin, die Richtung von Tischtennisschlägen zu antizipieren. Die Schlagbewegungen wurden in dieser Studie als PLDs dargestellt, so dass ausschließlich Bewegungsinformationen und somit keine Informationen über den Ballflug verfügbar waren. Die Probanden zeigten, wie in der Studie von Knoblich und Flach, eine signifikant bessere Antizipationsleistung, wenn es sich bei den beobachteten Tischtennisschlägen um Bewegungen der eigenen Person handelte. Die Ergebnisse dieser Studien sind besonders bemerkenswert wenn man bedenkt, dass Personen in der Regel bei eigenen Bewegungen eine geringere visuelle Vertrautheit aufweisen als bei fremden Bewegungen.

Um die visuelle Vertrautheit bei einer Trainingsstudie als Einflussfaktor auszuschließen, ließen Casile und Giese (2006) ihre Probanden Bewegungen mit verbundenen Augen ohne visuelles Feedback trainieren. Die Probanden hatten auf diese Weise ausschließlich eine motorische Vorerfahrung der Bewegungen, die ihnen im zweiten Teil des Experiments im Rahmen einer Diskriminationsaufgabe als PLDs präsentiert wurden. Dabei zeigten die Probanden im Vergleich zu einem Prä-Test vor der Trainingsintervention ausschließlich für die Bewegung eine bessere Wahrnehmungsleistung, deren Ausführung die Probanden zuvor trainiert hatten. Diesen Einfluss von motorischem Training auf die Bewegungswahrnehmung führen die Autoren auf die gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung zurück.

Einen weiteren Hinweis darauf, dass eigene motorische Erfahrungen die Wahrnehmung von Bewegungen beeinflussen, kommt von Studien der Expertiseforschung, in denen die Wahrnehmungsleistungen von motorisch und visuell erfahrenen Experten mit nur visuell erfahrenen Experten (beispielsweise Journalisten) und unerfahrenen Novizen verglichen werden (Aglioti et al., 2008; Cañal-Bruland et al., 2012). Dabei zeigte sich in beiden Studien, dass die Experten, die neben der visuellen auch motorische Vorerfahrungen besitzen, die besten Antizipationsleistungen aufweisen (siehe Kap. 1.2.4). Neurowissenschaftliche Studien verglichen die Wahrnehmung von Bewegungen mit der Bewegungsausführung und konnten zeigen, dass zahlreiche Gehirnareale sowohl während der Ausführung als auch bei der Beobachtung von Bewegungen aktiviert sind (siehe zum Beispiel Buccino et al., 2001; Gazzola & Keysers, 2009; Grèzes & Decety, 2001; Hamilton et al., 2006; Hari et al., 1998; Molnar-Szakacs et al.,

2005; Mukamel et al., 2010). Detaillierte Ergebnisse von Studien zur Untersuchung der Gehirnaktivierung während der Bewegungsbeobachtung und dem Einfluss der Expertise des Beobachters auf diese Aktivierung werden in Kapitel 1.4 und Kapitel 1.5 diskutiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Vielzahl an Studien existiert, deren Ergebnisse Hinweise darauf liefern, dass die Wahrnehmung und die Ausführung von Handlungen, wie durch den Common Coding Ansatz beschrieben, auf eine gemeinsame Repräsentation zurückgreifen. Des Weiteren unterstützen die Ergebnisse einer besseren Effektantizipation bei Bewegungen, für die der Beobachteter eine ausgeprägte motorische Vorerfahrung besitzt, die Theory of Event Coding von Hommel und Kollegen (2001), nach der wahrgenommene und ausgeführte Handlungen in Form des wahrnehmbaren Effekts repräsentiert sind.

1.3.2 Interne Modelle

Ein Erklärungsansatz, der zum einen ein Modell der motorischen Kontrolle liefert, darüber hinaus aber auch die Verwendung dieser motorischen Prozesse zur Wahrnehmung von Handlungen beschreibt, sind die internen Modelle. Die Theorie der internen Modelle ist ursprünglich ein computationaler Ansatz, der entwickelt wurde, um den Status von Systemen anhand der Eingangs- und Ausgangssignale zu bestimmen. Da die Berechnung des aktuellen sowie des zukünftigen Status bei der motorischen Kontrolle eine wichtige Rolle spielt, werden die internen Modelle jedoch auch für die Kontrolle der Bewegungsausführung diskutiert (siehe zum Beispiel Wolpert, 1997). Diese beinhalten ein inverses sowie ein Vorwärtsmodell (für einen Überblick siehe Wolpert et al., 1998b). Bei der Ausführung von eigenen Bewegungen wird das inverse Modell zur Ermittlung der motorischen Befehle genutzt, die benötigt werden um einen gewünschten Effekt zu erzielen (Miall, 2003; Wolpert et al., 1998b). Dabei greift das inverse Modell auf die Verbindung zwischen Bewegungen und dem jeweils erzielten Effekt zurück, die in vorangegangenen Bewegungsausführungen erlernt wurde (Ito, 2008; siehe Kap. 1.3). Ausgangspunkt der Berechnung ist der intendierte Effekt, auf dessen Basis die motorischen Befehle ermittelt werden (Miall, 2003; Wolpert et al., 1998b). Das Vorwärtsmodell wird verwendet, um anhand des aktuellen Status des motorischen Systems sowie des geplanten motorischen Befehls den sensorischen Effekt der Bewegung vorherzusagen (Miall, 2003; Miall & Wolpert, 1996; Wolpert et al., 1998b). Diese Vorhersage ist insbesondere in frühen Phasen von schnellen Bewegungen relevant, da Afferenzen in diesem Fall aufgrund der zeitlichen Verzögerung des sensorischen Feedbacks nicht zur Korrektur der ausgeführten Bewegung genutzt werden können (Blakemore & Sirigu,

2003; Wolpert & Flanagan, 2001; Wolpert et al., 1998b). Weiterhin vergleicht das Vorwärtsmodell im Verlauf der Bewegung den vorhergesagten sensorischen Effekten des Vorwärtsmodells mit den tatsächlichen Effekten der Bewegungsausführung. Für den Fall einer Diskrepanz kommt es zu einer Korrektur der Bewegungsausführung (Wolpert & Flanagan, 2001).

Diverse Autoren gehen davon aus, dass die beschriebenen internen Modelle nicht nur zur Vorhersage der Effekte von eigenen ausgeführten Handlungen genutzt werden, sondern auch zur Effektvorhersage von beobachteten Bewegungen (Blakemore & Decety, 2001; Gazzola & Keysers, 2009; Miall 2003; Oztop et al., 2005; Prinz, 2006; Schippers & Keysers, 2011; Shmuelof & Zohary, 2007; Wolpert et al., 2003; Wolpert & Flanagan, 2001; Yarrow et al., 2009). Auch während der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen profitiert der Beobachter von der erlernten Verbindung zwischen Bewegungen und ihren Effekten (Gazzola & Keysers, 2009). Basierend auf dieser Verbindung kann das inverse Modell verwendet werden, um anhand der beobachteten Bewegung auf die motorischen Befehle zu schließen, die zur Ausführung dieser Bewegung nötig sind (Schippers & Keysers, 2011). Wurden die motorischen Befehle ermittelt, stellen diese den Ausgangspunkt des Vorwärtsmodells dar, mit dessen Hilfe die Effekte der beobachteten Bewegung antizipiert werden können (Gazzola & Keysers, 2009). Das Vorwärtsmodell wird demnach nicht nur genutzt, um die Effekte von eigenen Bewegungen zur Bewegungskorrektur vorherzusagen, sondern auch zur Effektvorhersage beobachteter Handlungen. Für Informationen zur neuronalen Implementierung der internen Modelle siehe Kapitel 1.5.5.

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Hinweise für eine gemeinsame Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung beschrieben wurden, soll im folgenden Kapitel nun eine mögliche neuronale Grundlage für diese gemeinsame Repräsentation vorgestellt werden.

1.4 Das Spiegelneuronensystem

Aus den Ergebnissen der Studien, die auf Verhaltensebene einen Hinweis dafür liefern, dass Wahrnehmung und Handlung gemeinsam repräsentiert sind, resultiert die Frage, ob auf hirnebene physiologischer Ebene Nachweise für diese Theorie zu finden sind. Mit einer Einzelzellableitung im Areal F5 des Makaken konnten Rizzolatti und Kollegen (1996) zeigen, dass das abgeleitete Neuron nicht nur während der Ausführung einer Objektmanipulation feuerte, sondern auch, wenn der Affe die Ausführung dieser Handlung lediglich beobachtete. Diese Neuronen werden als sogenannte Spiegelneuronen (SN) bezeichnet und sind, wie eine Folgestudie von Gallese und Goldmann (1998) zeigen konnte, zu 60 Prozent auf eine spezifische Greif-,

Hand- oder Mundbewegung spezialisiert. Die restlichen SN reagieren auf unterschiedliche Bewegungsausführungen, was von Rizzolatti und Luppino (2001) als Generalisierung des Handlungsziels interpretiert wurde. Gemäß Rizzolatti und Craighero (2004) setzt sich das Spiegelneuronensystem (SNS) im Gehirn des Makaken aus SN im frontalen Areal F5 und aus SN im inferioren Parietallappen (Areal PF) zusammen. Auf Basis der Ergebnisse von Kohler et al. (2002) und Umiltà et al. (2001), die zeigen konnten, dass einige SN auch feuern, wenn Teile der Handlung nicht zu sehen sind (Umiltà et al., 2001) sowie wenn lediglich handlungsassoziierte Geräusche präsentiert werden (Kohler et al., 2002), diskutieren Rizzolatti und Craighero (2004) das Verstehen von beobachteten Handlungen als wichtigste Funktion des SNS des Makaken.

Seit der Entdeckung der SN im Gehirn des Makaken, wird ein solcher Mechanismus auch für den Menschen diskutiert (siehe zum Beispiel Buccino et al., 2001; Gallese et al., 2004; Grafton et al., 1996; Iacoboni et al., 1999; Iacoboni, 2009; Molenberghs et al., 2012; Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti et al., 2002; Rizzolatti & Fabbri-Destro, 2008; für einen Überblick siehe Rizzolatti & Craighero, 2004). Da Einzelzellableitungen im menschlichen Gehirn nur in Ausnahmefällen möglich sind, beruhen die Hinweise auf ein SNS beim Menschen vor allem auf indirekten Nachweisen von Neuronenpopulationen, die sowohl an der Ausführung, als auch an der Beobachtung einer Bewegung beteiligt sind. So konnten Fadiga und Kollegen (1995) beispielsweise mithilfe von TMS über dem präzentralen Gyrus (M1) zeigen, dass die Beobachtung von Handbewegungen zu einer spezifischen Steigerung der Aktivität von Bereichen in M1 führt, die die Probanden auch für die Ausführung der beobachteten Handbewegungen nutzen. Zusätzlich ergab die Studie, dass nicht wie beim Makaken nur die Beobachtung von zielgerichteten Bewegungen zu Aktivität des SNS führte, sondern auch die Beobachtung von Bewegungen ohne explizites Handlungsziel. Ein Ergebnis, das von Maeda et al. (2002) und Patuzzo et al. (2003) repliziert wurde. Weiterhin führte die Verwendung von TMS zu der Erkenntnis, dass der zeitliche Verlauf der kortikalen Erregung bei der Beobachtung einer Handlung mit dem Verlauf bei der Ausführung dieser Bewegung übereinstimmt (Gangitano et al., 2001). Buccino und Kollegen (2001) ließen Probanden während einer fMRT-Messung verschiedene Fuß-, Hand- und Mundbewegungen beobachten und konnten auf diese Weise zeigen, dass die Repräsentationen der beobachteten Bewegungen im inferioren Parietallappen (IPL) sowie im inferioren frontalen Gyrus (IFG) und im prämotorischen Kortex (PMC) genauso somatotop gegliedert sind, wie bei der Ausführung dieser Bewegungen. Diverse Studien lieferten außerdem Hinweise darauf, dass Handlungen im menschlichen

SNS, wie auch beim Makaken, in Form der Handlungsziele repräsentiert sind und nicht in Form der Bewegungen, die nötig sind, um diese Ziele zu erreichen (Gangitano et al., 2004; Gazzola et al., 2007a,b; Iacoboni et al., 2005; Hamilton & Grafton, 2006, für einen Überblick siehe Rizzolatti & Fabbri-Destro, 2008). So konnte eine Studie von Iacoboni und Kollegen (2005) zeigen, dass die gleiche Bewegung in verschiedenen Situationen, die unterschiedliche Handlungsintentionen suggerierten, zu Aktivierungsunterschieden im IFG führte.

1.4.1 Funktionen des Spiegelneuronensystems

In einer fMRT-Studie präsentierten Buccino und Kollegen (2004) ihren Probanden Mundbewegungen, die entweder von einem Mensch, einem Affe oder einem Hund ausgeführt wurden. Beobachteten die Probanden eine Beißbewegung, die von allen drei Spezies ausgeführt werden konnte, resultierte dies in einer vergleichbaren Aktivität des IFG und des IPL. Sahen die Probanden hingegen spezifische kommunikative Mundbewegungen der entsprechenden Spezies, wie zum Beispiel ein Bellen des Hundes, zeigte sich nur dann eine Aktivierung in Arealen des SNS, wenn die Probanden die Bewegung auch selbst ausführen konnten. Nach Einschätzung der Autoren wird das SNS des Menschen genutzt, um beobachtete Bewegungen mithilfe des eigenen motorischen Systems intern zu simulieren. Simulation bezieht sich in diesem Zusammenhang auf das mentale Wiederholen einer Handlung ohne eine aktiv ausgeführte Bewegung. In der Literatur werden hauptsächlich zwei Funktionen einer möglichen internen Simulation diskutiert. So gehen Rizzolatti & Fabbri-Destro (2008) davon aus, dass die beobachteten Bewegungen intern simuliert werden, um auf das Ziel der Handlung schließen zu können. Diese Ansicht wird von vielen weiteren Autoren geteilt (Gallese et al., 2004; Keysers & Gazzola, 2007; Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti & Craighero, 2004; Zentgraf et al., 2011; für einen Überblick siehe van Overwalle & Baetens, 2009). Bei der Beobachtung einer Bewegung, die im Bewegungsrepertoire des Beobachters vorhanden ist, wird die Verbindung zwischen Bewegungsausführung und resultierendem Bewegungseffekt genutzt, um das Bewegungsziel der beobachteten Handlung zu simulieren. Voraussetzung dafür ist, dass der Zusammenhang zwischen der ausgeführten Handlung und dem resultierenden Effekt zuvor erlernt wurde (Overwalle & Baetens, 2009). Dass die Aktivierung der Areale des SNS von der motorischen Erfahrung des Beobachters abhängen, konnten auch die Studien von Calvo-Merino et al. (2005, 2006) zeigen. In diesen resultierte die Beobachtung von Bewegungen, für die die Beobachter eine motorische Expertise besaßen, unter anderem in einer stärkeren Aktivierung des IFG, des PMC sowie des IPL (siehe Kap. 1.2.3).

Als zweite Funktion des SNS diskutieren zahlreiche Autoren die Imitation von beobachteten Handlungen (siehe zum Beispiel Iacoboni & Dapretto, 2006; Koski et al., 2002; Rizzolatti & Craighero, 2004, für einen Überblick siehe Iacoboni, 2009). Nach Iacoboni (2009) wird die visuelle Repräsentation der Bewegung aus dem superioren temporalen Sulcus (STS) an die frontalen und parietalen Areale des SNS übermittelt, wo die beobachtete Bewegung dann mithilfe der eigenen motorischen Repräsentation der Bewegung simuliert und das Ergebnis der simulierten Bewegung antizipiert wird. Dieses wird anschließend im STS mit dem tatsächlichen Ergebnis verglichen. Bei einer guten Passung zwischen der simulierten und der beobachteten Bewegung wird diese vom Beobachter ausgeführt, anderenfalls wird die geplante Bewegungsausführung korrigiert (Iacoboni, 2009). Indem neue Bewegungen in bereits bekannte Teilbewegungen aufgeteilt werden, könnten auf diese Weise auch Bewegungen imitiert werden, die von dem Beobachter bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht beherrscht werden (Frey & Gerry, 2006; Iacoboni, 2009; Suchan et al., 2008). In diesem Aspekt unterscheidet sich die Funktion des SNS des Menschen jedoch von der des Affen, da letzterer trotz seines SNS nicht in der Lage ist beobachtete Bewegungen zu imitieren (Hauser & Wood, 2010; Prinz, 2006). Ob das menschliche SNS im Vergleich zum Affen im Laufe der Entwicklung zusätzliche kognitive Funktionen entwickelt hat ist zum aktuellen Zeitpunkt Gegenstand der Diskussion.

1.4.2 Die Anatomie des menschlichen Spiegelneuronensystems

Gemäß den Übersichtsartikeln von Rizzolatti und Craighero (2004) sowie von Iacoboni und Dapretto (2006) setzt sich das menschliche SNS aus dem IPL und dem ventralen prämotorischen Kortex (vPMC) sowie dem angrenzenden IFG zusammen. Die Areale des menschlichen SNS entsprechen den Arealen PF, F4 und F5, die in Untersuchungen am Makaken gefunden wurden, so dass zunächst von einer anatomisch ähnlichen Repräsentation des SNS auszugehen war (Rizzolatti & Craighero, 2004). Aktuelle Studien konnten jedoch zeigen, dass sich nicht nur in vPMC, IFG und IPL Neuronenpopulationen befinden, die sowohl während der Ausführung als auch während der Beobachtung einer Bewegung aktiv sind, sondern auch in vielen weiteren Arealen, wie zum Beispiel im dorsalen prämotorischen Kortex (dPMC) sowie im superioren Parietallappen (SPL) (Gazzola & Keysers 2009, Molenberghs et al., 2012, Mukamel et al. 2010). Eine fMRT-Untersuchung von Gazzola & Keysers (2009), deren Ergebnisse auf Einzelpersonenebene betrachtet und nicht über alle Versuchspersonen gemittelt wurden, ergab, dass unter anderem auch der dPMC, das supplementär-motorisches Areal

(SMA), der SPL, der primäre somatosensorische Kortex (S1) sowie das Cerebellum Voxel enthalten, die sowohl während der Bewegungskonzeption, als auch bei der Bewegungsbeobachtung aktiviert sind. Molenberghs und Kollegen (2012) analysierten in ihrer Metaanalyse 125 fMRT-Studien, in denen die Eigenschaften eines potentiellen SNS untersucht wurden. Dabei konnten die Autoren zum einen bestätigen, dass die Areale vPMC, IFG und IPL wie auch beim Makaken „Spiegel-Eigenschaften“ besitzen und zum anderen konnten die Autoren zeigen, dass sich das SNS beim Menschen nicht auf diese drei Areale beschränkt, sondern auch den dPMC sowie den SPL umfasst. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Mukamel und Kollegen (2010), als sie die Gehirnaktivierung während der Beobachtung und Ausführung von Handbewegungen und emotionalen Gesichtsausdrücken anhand von Einzelzelleitungen im Rahmen einer Epilepsiebehandlung am Menschen untersuchten. Die Autoren fanden dabei heraus, dass der SMA und der Hippocampus ebenfalls Neuronen enthalten, die sowohl bei der Ausführung als auch bei der Beobachtung der Bewegungen aktiviert sind. Die Ergebnisse der Studie von Mukamel et al. (2010) sind damit auch der erste direkte Nachweis von Spiegelneuronen am Menschen. Da die Auswahl an abgeleiteten Neuronen der Epilepsiepatienten jedoch ausschließlich auf klinischen Gesichtspunkten basierte, wurden in dieser Studie keine Neuronen in den klassischen SNS-Arealen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der zuletzt aufgeführten Studien (Gazzola & Keyser 2009, Molenberghs 2012, Mukamel et al. 2010) liefern somit auch einen Hinweis, warum das AON, das alle an der Wahrnehmung von Bewegungen beteiligte Gehirnareale umfasst, deutlich mehr Areale beinhaltet, als es die Kernareale des SNS vermuten lassen (Zentgraf et al., 2011). Die Zusammensetzung sowie die Funktion des AON sollen im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

1.5 Das Action Observation Network

Eine der ersten Studien, die das AON als elementares Netzwerk für die Wahrnehmung von Bewegungen diskutiert hat, stammt von Cross und Kollegen (2009). Darin definierten die Autoren das AON als Netzwerk, das alle Gehirnareale umfasst, die an der Bewegungswahrnehmung beteiligt sind und sich daher nicht auf die Areale beschränkt, die ausschließlich während der Wahrnehmung und der Ausführung von Bewegungen aktiv sind. In ihrer Studie ermittelten Cross et al. (2009) die Areale des AON, indem sie die Beobachtung von Bewegungssequenzen mit der Ruhebedingung ohne visuelle Stimulation kontrastierten.

1.5.1 Die Anatomie des Action Observation Networks

Einen umfassenden Überblick über die Zusammensetzung des AON gab ein Jahr später die Metaanalyse von Caspers und Kollegen (2010), die 104 Studien berücksichtigte, in denen die Bewegungsbeobachtung Gegenstand der Untersuchung war. Gemäß dieser Studie zeigten der IFG, der dPMC und vPMC, der SMA, der S1, der IPL, der SPL, der mittlere temporale Gyrus (MTG), das fusiforme Gesichts- und Körperareal, das visuelle Areal V5 sowie der intraparietale Sulcus (IPS) eine stärkere Aktivierung während der Beobachtung von menschlichen Bewegungen. Bekräftigt wurde die Beteiligung dieser Areale an der Beobachtung von Bewegungen durch Studien, in denen die repetitive transkranielle Magnetstimulation (rTMS) eingesetzt wurde, um temporäre Läsionen in Arealen des AON zu erzeugen und auf diese Weise die Funktion der jeweils inhibierten Region zu untersuchen (Candidi et al., 2008; Pobric & Hamilton, 2006; Urgesi et al. 2007). So führte eine rTMS-induzierte temporäre Läsion des vPMC beispielsweise zu einer Verminderung der Leistung bei der Wahrnehmung von biologischen Bewegungen und unterstrich damit die Bedeutung des Areals für die Bewegungswahrnehmung (Candidi et al., 2008).

Zusätzlich zu den Gehirnarealen, die von Caspers und Kollegen (2010) als Bestandteil des AON berichtet wurden, fanden diverse Studien während der Bewegungsbeobachtung auch Aktivierung in Arealen des Cerebellums (Buccino et al., 2004; Gallagher & Frith, 2004; Gazzola & Keysers, 2009; Gazzola et al., 2007a; Hamilton & Grafton, 2006; Molenberghs et al., 2012; Munzert et al., 2008; Pilgramm et al., 2010). Dies gilt auch für Bewegungen, die als PLDs dargestellt wurden und die daher nur kinematische Informationen beinhalteten (Grossman et al., 2000; Vaina et al., 2001). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass das Cerebellum ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des AON ist (Calvo-Merino et al., 2006). Im Gegensatz zu früheren Publikationen, in denen das Cerebellum ausschließlich mit motorischen Funktionen assoziiert wurde (Holmes, 1939; Glickstein, 1993), zeigen aktuelle Studien, dass das Cerebellum auch in nicht-motorischen Prozessen involviert ist. So ergab eine Studie von Sokolov und Kollegen (2010), dass Patienten, die eine Läsion in Lobulus VII und VIII sowie in Crus I des lateralen Cerebellums aufweisen, Defizite bei der Beobachtung von biologischen Bewegungen haben. Dies konnte durch eine Studie von Cattaneo und Kollegen (2012) bestätigt werden. Darüber hinaus spielt das Cerebellum insbesondere auch bei anderen kognitiven Prozessen eine wichtige Rolle (Desmond & Fiez, 1998; Fink et al., 2000; Imaizumi et al., 1997; Rao et al, 1997; Schlösser et al., 1998; für einen Überblick siehe Stoodley & Schmahmann, 2009; Strick et al., 2009). Ein Schwachpunkt vieler Studien, die eine Beteiligung des Cere-

bellums an der Bewegungsbeobachtung zeigen konnten, ist, dass entweder keine Koordinaten der gefundenen Aktivierung im Cerebellum angegeben wurden oder zumindest auf eine spezielle Normalisierung des Cerebellums verzichtet wurde, so dass eine exakte Lokalisierung der Aktivierungsmaxima nicht möglich ist (für genauere Informationen siehe Diedrichsen (2006) sowie Kap. 2.3.6). Des Weiteren ist in einigen Arbeiten zu beobachten, dass versäumt wurde die gefundenen Aktivierungen des Cerebellums anschließend in der Diskussion der Ergebnisse aufzugreifen. Ungeachtet dieser methodischen Einschränkungen kann das Cerebellum jedoch als Bestandteil des AON angesehen werden (Calvo-Merino et al., 2006).

1.5.2 Die Funktion des Action Observation Networks

Als Funktion des AON wird in der Literatur insbesondere die Simulation von beobachteten Ereignissen zur Antizipation deren spezifischen Effekts diskutiert (Gazzola & Keysers, 2009; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Urgesi et al., 2010; Zentgraf et al., 2011). Dabei wird das AON sowohl mit der Effektantizipation von nicht-biologischen Ereignissen (Schubotz, 2007), als auch von Alltagshandlungen (Avenanti et al., 2013; Stadler et al., 2011, 2012; Urgesi et al., 2010) sowie von Handlungen im Sport (Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011) assoziiert. So konnten Studien aus der Arbeitsgruppe von Ricarda Schubotz zeigen, dass die Antizipation von abstrakten nicht-biologischen Ereignissen, in diesem Fall die Vorhersage der korrekten Fortführung einer logischen Symbolreihe, zu einer Aktivierung des PMC führt (Schubotz & von Cramon, 2003; Wolfensteller et al., 2007) und umgekehrt die Läsion des PMC zu einer schlechteren Vorhersageleistung bei dieser Aufgabe führt (Schubotz et al., 2004). Nach dem Modell von Schubotz (2007) rekrutieren Prädiktionsleistungen unabhängig davon, ob sie in einem motorischen oder einem kognitiven Kontext erforderlich sind, Areale innerhalb des AON, spezifisch den PMC (Schubotz & von Cramon, 2003; Wolfensteller et al., 2007, für eine Übersicht siehe Schubotz, 2007). Der prämotorische Kortex wird demnach nicht nur zur Vorhersage biologischer Bewegungen genutzt, sondern auch zur Vorhersage nicht-biologischer Ereignisse (beispielsweise Folgetöne einer Melodie, Rhythmus von Wellenbewegungen).

Mit einem Experiment, in dem die Probanden während einer fMRT-Messung die Folgeaktion von verschiedenen Alltagstätigkeiten (beispielsweise Kaffee kochen, Blumen gießen) vorher-sagen mussten, fanden Stadler und Kollegen (2011) heraus, dass diese Vorhersage im Vergleich zu anderen Beobachtungsaufgaben (Wiedererkennen von Situationen, Detektion von Stimulusveränderungen) zu einer stärkeren Aktivierung von prä-SMA und dPMC führte. In

einem Folgeexperiment nutzten die Autoren dann rTMS, um die Funktion des dPMC durch eine temporäre Läsion genauer zu untersuchen (Stadler et al., 2012). Dabei zeigte sich, dass eine Störung des dPMC zu Beginn der Antizipationsphase zu mehr Fehlern bei der Vorhersage von beobachteten Alltagshandlungen führte als eine Störung der Vertex Region. Da eine rTMS-Störung des dPMC zu einem späteren Zeitpunkt der Antizipationsphase nicht mehr mit einer Leistungsverschlechterung assoziiert war, gehen die Autoren davon aus, dass der dPMC insbesondere an der Initiierung von Antizipationsprozessen beteiligt ist. Unterstützt werden die Ergebnisse durch die Untersuchung von Avenanti und Kollegen (2013), die mithilfe von rTMS ebenfalls eine Beteiligung von Arealen des AON an der Vorhersage von beobachteten Alltagshandlungen zeigen konnten.

Die Vorhersage von Handlungseffekten spielt jedoch nicht nur bei alltäglichen Tätigkeiten eine Rolle, sondern insbesondere auch im Sport. Deutlich wird dies durch die Ergebnisse von diversen Studien der Expertiseforschung, die zeigen, dass Experten einer Sportart signifikant bessere Antizipationsleistungen aufweisen als weniger erfahrene Athleten (siehe Kap. 1.2.4). Vor allem in Spielsituationen, in denen die Reaktion des Athleten auf eine Handlung des Gegners unter großem Zeitdruck stattfindet, wie es beispielsweise beim Tennisreturn der Fall ist, kommt der Antizipation von Handlungseffekten eine große Bedeutung zu. Daher sind insbesondere die Sportarten sehr gut geeignet, um den Einfluss des AON während der Antizipation von Handlungseffekten zu untersuchen. Wright und Kollegen (2007) präsentierten beispielsweise Novizen verschiedene Tennisvideos während einer fMRT-Messung und verglichen die Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation der Schlagrichtung von Tennisaufschlägen mit der Aktivierung während der Beobachtung von Ball prellenden Spielern. Dieser Kontrast resultierte in einer stärkeren Aktivierung von IPL, SPL und IFG während der Antizipationsbedingung im Vergleich zur reinen Beobachtungsbedingung. Und auch in zwei nachfolgenden Studien mit Badmintonexperten und –novizen fanden die Autoren bei der Vorhersage von Handlungseffekten eine stärkere Aktivierung von Arealen des AON und damit Unterstützung für die Theorie, dass eine wichtige Funktion des AON in der Antizipation der Effekte beobachteter Handlungen besteht (Wright et al., 2010, 2011). Weitere Unterstützung kommt von einer fMRT-Studie von Abreu et al. (2012), in der sowohl Basketballexperten als auch Novizen ohne Basketballerfahrung vorhersagen mussten, ob es sich bei den beobachteten Basketballfreiwürfen um einen Treffer handelte oder nicht, wobei die Flugkurven des Balles nur etwas bis zur Hälfte zu sehen waren. Kontrastiert wurde die neuronale Aktivität während der Antizipation der Basketballwürfe mit einer Bedingung, in

der die Probanden die Farbe angeben sollten, in der der Ball im Laufe des Videos kurz aufgeleuchtet hatte. Die Stimulusvideos in dieser Bedingung entsprachen, abgesehen davon, dass sie rückwärts abgespielt wurden, den Videos der Antizipationsbedingung. Gemäß den Autoren unterschieden sich die beiden Bedingungen daher nur hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenstellung, nicht aber durch eine unterschiedliche visuelle Stimulation. Unabhängig von der Expertise der Probanden kam es während der Antizipation der Freiwürfe unter anderem zu einer stärkeren Aktivierung des IPL, des SPL, des S1, des PMC sowie des IFG. Bishop und Kollegen (2013) konnten bei ihrem Vergleich zwischen der Antizipation der Laufrichtung von Fußballspielern und der Beobachtung der Spieler beim Gehen mit Ball keine Aktivierungsunterschiede in den Arealen des AON finden. Reduzierten die Autoren jedoch das Signifikanzniveau auf $p < .005$ unkorrigiert (Clustergröße = 60), zeigte sich ein vergleichbares Aktivierungsmuster des AON wie bei Abreu et al. (2012) und Wright et al. (2010, 2011). Bishop und Kollegen (2013) führten dies darauf zurück, dass die Präsentation der Stimulusvideos in der vorliegenden Studie nicht in separaten Blöcken, sondern randomisiert erfolgte. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass zahlreiche fMRT- und rTMS-Studien sowohl für Alltagstätigkeiten als auch für Handlungen im Sport eine Beteiligung des AON an der Antizipation von Handlungseffekten zeigen konnten. Diese Ergebnisse bestätigen somit die Theorie, dass eine wichtige Funktion des AON in der Vorhersage von Effekten unterschiedlicher Ereignisse besteht (Gazzola & Keysers, 2009; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Urgesi et al., 2010; Zentgraf et al., 2011). Welche Prozesse dieser Effektantizipation im AON zugrunde liegen könnten, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

1.5.3 Die Direct Matching und die Predictive Coding Theorie

Rizzolatti, Fogassi und Gallese beschreiben in ihrem Überblicksartikel von 2002 zwei mögliche Theorien auf die Frage, welche Prozesse während des Schließens auf das Handlungsziel und somit auf den Effekt der beobachteten Bewegung ablaufen. Die visuelle Hypothese geht davon aus, dass das Verstehen von Handlungen auf einer visuellen Analyse der Elemente basiert, die eine Handlung beschreiben. Bei einer Wurfbewegung wären dies zum Beispiel der Körper des Akteurs, das geworfene Objekt sowie die Trajektorie der Abwurfbewegung. Eine Beteiligung von motorischen Arealen ist bei diesem Erklärungsansatz nicht notwendig, die Analyse findet insbesondere in primären und sekundären visuellen Arealen statt. In letzteren, wie zum Beispiel dem STS, werden die visuell wahrgenommenen Merkmale integriert und darauf aufbauend wird dann eine Erwartung bezüglich des Handlungsziels generiert. Ein

Schwachpunkt der visuellen Hypothese ist jedoch, dass sie nicht genauer beschreibt, wie es zu dieser Erwartung kommt (Rizzolatti et al., 2002).

Die Direct Matching Theorie basiert hingegen auf der Annahme, dass das Ziel einer Handlung dadurch verstanden wird, dass die beobachtete Bewegung vom Beobachter mithilfe der eigenen motorischen Repräsentationen intern simuliert wird und aufgrund der zuvor bei der eigenen Ausführung erlernten Verbindung zwischen Bewegungen und ihrem Effekt (siehe Kap. 1.3) den Effekt der beobachteten Bewegung vorhersagen kann (Rizzolatti & Craighero, 2004; Rizzolatti & Luppino, 2001; Zentgraf et al., 2011). Die neuronale Grundlage für diese Theorie bilden jene Studien, die Nachweise für Neuronen liefern konnten, die sowohl während der Ausführung, als auch während der Beobachtung einer Bewegung aktiviert sind (für einen Überblick siehe Molenberghs et al., 2012 und Kap. 1.4). Eine genaue Vorhersage ist damit immer dann möglich, wenn eine besonders gute Passung zwischen der beobachteten Bewegung und der eigenen motorischen Repräsentationen besteht, auch als motorische Resonanz bezeichnet (Aglioti et al., 2008). Unterstützung erhält diese Hypothese von Studien die zeigen konnten, dass die Effekte von eigenen beobachteten Bewegungen, für die eine perfekte Passung zwischen beobachteter und simulierter Bewegung besteht, besser antizipiert werden können, als die Effekte von Bewegungen anderer Personen (Bischoff et al. 2012; Knoblich & Flach, 2001). Ein weiteres Argument für ein solches „Direct Matching“ bringen die bereits vorgestellten Studien von Calvo-Merino und Kollegen (2005, 2006). So fanden die Autoren heraus, dass es zu einer stärkeren Aktivierung von Arealen des AON kam, wenn die Beobachter eine motorische Expertise für die beobachtete Bewegung hatten.

Der größte Kritikpunkt der Direct Matching Theorie ist der fehlende Erklärungsansatz bezüglich der Frage, wie ein Beobachter anhand der Simulation der beobachteten Bewegung auf die Intention einer Handlung schließen kann, wenn dieser Handlung verschiedene Ziele zugrunde liegen könnten (Kilner et al., 2007; Zentgraf et al., 2011). So kann eine Person beispielsweise ein Messer greifen, um mit diesem zu essen oder um es zu werfen. Die Greifbewegung ist dabei womöglich identisch. Dies ist allein durch die interne Simulation der Bewegung nicht zu unterscheiden und doch sind Menschen dazu in der Lage, das Handlungsziel in einer solchen Situation zu erkennen.

Die Predictive Coding Theorie von Kilner und Kollegen (2007) geht hingegen davon aus, dass das Ziel einer Handlung durch die Vorhersage der Handlung auf verschiedenen Hierarchieebenen innerhalb des AON antizipiert werden kann, indem der Vorhersagefehler in jeder Ebene minimiert wird. Diese Hierarchieebenen umfassen die Intention und den Effekt der

Handlung, sowie die motorischen Befehle und die Kinematik, die nötig sind, um den gewünschten Effekt zu erreichen. Im Gegensatz zur Vorhersage gemäß der Direct Matching Theorie, die ausschließlich als Bottom-Up-Prozess und damit stimulusgetrieben stattfindet, bezieht die Vorhersage gemäß der Predictive Coding Theorie auch die Erwartungen des Beobachters (Top-Down) mit ein. Diese Erwartung ist gemäß der Predictive Coding Theorie von Kilner und Kollegen (2007) der Ausgangspunkt für die Vorhersage des Ziels einer beobachteten Handlung. Beispielsweise hat der Beobachter durch verfügbare Kontextinformationen schon zu Beginn der Vorhersage eine Erwartung, die er in die Berechnung mit einbringen kann. Auf Basis des initial erwarteten Handlungsziels können mithilfe der eigenen motorischen Repräsentationen dann die motorischen Befehle vorhergesagt werden, die nötig sind, um das erwartete Ziel zu erreichen. Diese ermöglichen wiederum eine Vorhersage der Kinematik der beobachteten Bewegung. Auf jeder dieser hierarchischen Ebenen erfolgt ein Vergleich der Vorhersage mit der tatsächlichen Bewegung. Im Fall einer Diskrepanz zwischen beiden wird der Vorhersagefehler an die nächsthöhere Ebene rückgemeldet und die Vorhersage entsprechend angepasst. Stimmt die vorhergesagte Kinematik beispielsweise nicht mit der beobachteten Kinematik überein, führt dies zur Anpassung der motorischen Befehle und damit auch des erwarteten Ziels. Durch diese Minimierung des Vorhersagefehlers auf allen Hierarchieebenen kann das wahrscheinlichste Handlungsziel ermittelt werden (Kilner et al., 2007). So ist der Beobachter mithilfe von Kontextinformationen auch bei zwei unterschiedlichen Handlungszielen, die zu einer gleichen Bewegung führen, in der Lage, das Ziel der Handlung vorherzusagen (Zentgraf et al., 2011). Damit ist die Vorhersage nicht nur von den Parametern der Vorhersagemodelle abhängig, sondern wird durch das Einbeziehen der eigenen Erwartung, den damit verbundenen Kontextinformationen, sowie der eigenen Einschätzung, wie präzise diese Erwartung ist, gewichtet (Neal & Kilner, 2010; für ein Beispiel siehe Kilner et al., 2007, S. 163). Die Vorhersage in den einzelnen Ebenen findet in Arealen des AON statt (Neal & Kilner, 2010) und greift auf Mechanismen zurück, die während der Handlungsausführung zur Vorhersage der Effekte der eigenen Bewegungen verwendet werden (Kilner et al., 2007; Zentgraf et al., 2011; siehe Kap. 1.3.2). Die Predictive Coding Theorie beinhaltet damit, genau wie die Direct Matching Theorie, die Simulation der beobachteten Bewegung im eigenen AON, bezieht jedoch auch die Erwartungen des Beobachters mit ein. Dass es bereits bei der Beobachtung von statischen Bildern von Werkzeugen (Chao & Martin, 2000) und auch bei der Vorhersage von nicht-biologischen Ereignissen (Schubotz, 2007) zu einer Aktivierung von prämotorischen Arealen kommt, ist ein weiteres Argument für die Pre-

dictive Coding Theorie und gegen eine direkte Simulation der beobachteten Bewegung, wie sie für die Direct Matching Theorie diskutiert wird.

Zusammenfassend ist zur Funktionsweise der Vorhersage des Handlungsziels einer beobachteten Bewegung festzuhalten, dass es in vielen Situationen nicht ausreicht, die beobachtete Bewegung im AON gemäß der Direct Matching Theorie in einem reinen Bottom-Up-Prozess zu simulieren. Vielmehr hängt die Vorhersage des Handlungsziels häufig auch von der Situation ab, in der die Handlung stattfindet. Daher erscheint eine Vorhersage gemäß der Predictive Coding Theorie wahrscheinlicher. Diese geht davon aus, dass der Beobachter den Kontext zusammen mit der eigenen Erwartung und der motorischen Vorerfahrung mit in die Vorhersage einbringt. Auf Basis dieser Informationen kann der Beobachter dann ein erwartetes Handlungsziel generieren, das als Ausgangspunkt für die Vorhersage im AON in den niedrigeren Hierarchieebenen dient.

1.5.4 Einflussfaktoren des Action Observation Networks

Der Einfluss von Instruktionen

Ein weiterer Hinweis darauf, dass Top-Down-Prozesse die Verarbeitung von beobachteten Bewegungen im AON beeinflussen, kommt von einer Studie von Zentgraf und Kollegen (2005). In dieser hatten Probanden die Aufgabe gymnastische Bewegungen mit unterschiedlichen Instruktionen zu beobachten. Vor der Beobachtung erhielten sie entweder die Instruktion, sich die Bewegung im Anschluss an die Beobachtung kinästhetisch vorzustellen oder die beobachtete Bewegung im Anschluss hinsichtlich ihrer technischen Ausführung zu bewerten. Trotz exakt gleicher Stimuli zeigte sich dabei eine unterschiedliche Aktivierung des SMA. So führte die Beobachtung mit der Instruktion zur späteren Vorstellung zu einer stärkeren Aktivierung des SMA proper, die Beobachtung mit der Instruktion zur Bewertung der Bewegung hingegen zu einer stärkeren Aktivierung des prä-SMA. Die Autoren gehen davon aus, dass die Instruktion und damit das Ziel der Bewegungsbeobachtung einen Top-Down-Einfluss auf die Aktivierung der eigenen motorischen Repräsentationen bei der Bewegungsbeobachtung hat. Zu diesem Ergebnis kamen auch Stanley et al. (2010), die ebenfalls einen Einfluss von Top-Down-Prozessen auf die Wahrnehmung von Bewegungen zeigen konnten.

Der Einfluss von Expertise

Eine weitere Variable, die die Aktivierung des AON während der Beobachtung von Bewegungen und insbesondere während der Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen

unabhängig moduliert, ist die motorische Vorerfahrung des Beobachters und damit die Ausprägung der eigenen motorischen Repräsentationen. Für die Bewegungsbeobachtung konnten dies, neben den bereits vorgestellten Studien von Calvo-Merino et al. (2005, 2006), auch die Studien von Cross et al. (2009) sowie Pilgramm et al. (2010) zeigen. In der Studie von Cross und Kollegen (2009) beobachteten die Probanden zunächst unbekannte Tanzsequenzen während einer fMRT-Messung, um in den anschließenden fünf Wochen einen Teil der Sequenzen motorisch und einen weiteren Teil durch Beobachtung zu trainieren. Bei einer erneuten fMRT-Messung im Anschluss an das Trainingsprogramm sahen die Probanden dann sowohl Tanzsequenzen, die sie motorisch oder visuell trainiert hatten, als auch unbekannte Sequenzen. Bei der Beobachtung von Tanzbewegungen, deren Ausführung die Probanden trainiert hatten, zeigte sich im Vergleich zu den unbekannt Sequenzen eine stärkere Aktivierung von diversen Arealen des AON, unter anderem des IFG, des PMC sowie des IPL. Der Vergleich zwischen motorisch und visuell trainierten Bewegungen ergab darüber hinaus eine starke Aktivierung des dPMC während der Beobachtung von zuvor motorisch trainierten Bewegungen. In einer Studie mit Tanzexperten und Novizen konnten Pilgramm und Kollegen (2010) ebenfalls zeigen, dass die Bewegungsbeobachtung zu einer stärkeren Aktivierung des AON führt, wenn der Beobachter eine ausgeprägte motorische Repräsentation für diese Bewegungen besitzt. So resultierte der Vergleich von Tanzexperten mit Novizen in einer stärkeren Aktivierung des vPMC während der Beobachtung von Tanzbewegungen.

Wenn das AON zur Vorhersage von Handlungseffekten genutzt wird und dabei eine Simulation insbesondere in den Arealen stattfindet, die zur eigenen Ausführung dieser Handlung verwendet werden, ist während der Effektantizipation eine stärkere Aktivierung des AON bei Probanden mit einer ausgeprägten motorischen Vorerfahrung zu erwarten. Dies konnte von verschiedenen Studien bestätigt werden (Aglioti et al., 2008; Bischoff et al., 2012; Wright et al., 2010, 2011). Aglioti und Kollegen (2008) ließen Novizen, visuell erfahrene Journalisten und Trainer sowie visuell und motorisch erfahrene Basketballspieler das Resultat von Basketballfreiwürfen antizipieren. Sowohl die nur visuell erfahrenen Probanden als auch die visuell und motorisch erfahrenen Spieler zeigten bei der Vorhersage der Freiwürfe eine gesteigerte Erregbarkeit der Repräsentation der Unterarm- und der Finger Muskulatur, die beide auch an der Ausführung der Wurfbewegung beteiligt sind. Diese gesteigerte Erregbarkeit zeigte sich jedoch nicht bei der Vorhersage von Schüssen im Fußball. Und auch bei der unerfahrenen Probandengruppe resultierte die Vorhersage der Freiwürfe nicht in einer Veränderung der kortikalen Erregbarkeit. Darüber hinaus kam es nur bei den Basketballspielern während der

Antizipation von fehlerhaften Würfeln zu einer spezifischen Steigerung der Erregbarkeit der Repräsentation der Finger Muskulatur. Diese Steigerung zeigte sich dabei nur in der Versuchsbedingung, in der die Fingerstellung den leistungsrelevanten Faktor für einen Treffer darstellte. Sowohl bei den unerfahrenen Versuchsteilnehmern, als auch bei Probanden mit visueller Expertise konnte hingegen keine Veränderung der kortikalen Erregbarkeit gefunden werden. Die Ergebnisse passen damit zu den Verhaltensdaten der Studie, die zeigen konnten, dass nur die Basketballspieler die kinematischen Informationen der beobachteten Bewegung für ihre Vorhersage nutzen.

Bischoff und Kollegen (2012) untersuchten in ihrer fMRT-Studie die Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation der Schlagrichtung von eigenen und fremden Tischtennisschlägen. Obwohl die Probanden durch die verwendete Point-Light-Darstellung der Stimuli nicht erkennen konnten, ob sie einen fremden oder einen eigenen Schlag sehen, lag die Antizipationsleistung bei eigenen Schlägen signifikant über der Leistung bei Schlägen anderer Personen. Die bessere Antizipationsleistung bei eigenen Bewegungen war dabei mit einer stärkeren Aktivierung des IPL assoziiert. Die Autoren gehen davon aus, dass die Aktivierung des IPL durch die bessere Passung zwischen den eigenen motorischen Repräsentationen und der beobachteten Bewegung sowie den damit assoziierten Handlungseffekten ausgelöst wird und sich im Anschluss positiv auf die Antizipationsleistung auswirkt.

Und auch Wright und Kollegen konnten in zwei fMRT-Studien eine stärkere Aktivierung des AON bei der Effektantizipation von Experten finden (Wright et al., 2010, 2011). Zunächst zeigten Wright und Kollegen (2010), dass es bei durchschnittlichen Badmintonspielern während der Antizipation der Schlagrichtung von Badmintonschlägen zu einer Aktivierung des IPL und des PMC kommt. Der Vergleich zwischen Badmintonexperten und unerfahrenen Novizen während der Effektantizipation ergab eine stärkere Aktivierung von dPMC und IFG bei den erfahrenen Spielern. Zusätzlich zeigte sich, dass Videos von Badmintonschlägen, die früh ausgeblendet wurden, zu einer stärkeren Aktivierung des PMC sowie des IPL führten. Wright et al. (2010) interpretieren dies als Hinweis auf die größere Bedeutung von Antizipationsprozessen zu frühen Zeitpunkten der Bewegung. In ihrer zweiten Studie hatten erneut Badmintonexperten und Novizen die Aufgabe, die Richtung von Badmintonschlägen vorherzusagen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausgeblendet wurden (Wright et al., 2011). Die Schläge wurden in dieser Studie jedoch entweder als normales Video oder als PLD präsentiert. Wie in der vorangegangenen Studie zeigten die Probanden im Vergleich zu einer Beobachtungsaufgabe ohne Antizipationsanforderungen unabhängig vom Expertiseniveau

eine stärkere Aktivierung in diversen Arealen des AON. Im Kontrast mit den unerfahrenen Novizen zeigten die Badmintonexperten eine signifikant stärkere Aktivierung des IPL, des SPL, des IFG und des PMC. Dabei konnte bei den Experten zwischen der frühen und der späten Okklusion der Videostimuli unterschieden werden. Die frühe Okklusion (160 ms vor dem Ball-Schläger-Kontakt) war mit einer stärkeren Aktivierung des PMC, die späte Okklusion (80 ms nach dem Ball-Schläger-Kontakt) mit einer stärkeren Aktivierung des SPL assoziiert. Die Autoren gehen davon aus, dass der PMC speziell an der Verarbeitung der kinematischen Informationen beteiligt ist, denen zu diesem frühen Zeitpunkt besondere Bedeutung zukommt. Die Aktivierung des SPL liegt nach Ansicht der Autoren hingegen in der Verarbeitung von späten visuellen Hinweisen, wie der frühen Flugphase des Balls, begründet. Hervorzuheben ist weiterhin, dass bei den Experten keine Aktivierungsunterschiede in den Arealen des AON in Abhängigkeit von der Präsentationsart der Videostimuli gefunden wurden. So zeigten die Badmintonexperten bei der Antizipation von Bewegungen die als PLDs dargestellt wurden eine vergleichbare Aktivierung des AON. Die Autoren interpretieren dies als Nachweis dafür, dass Experten vor allem die kinematischen Informationen einer beobachteten Bewegung nutzen, um den Effekt der Handlung vorherzusagen (siehe Kap. 1.2.4).

In allen vorgestellten Studien kam es somit bei den Experten der jeweiligen Sportart im Vergleich zu unerfahrenen Probanden während der Antizipation von Handlungseffekten zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON. Diese wurde vorrangig in Arealen gefunden, die Spiegelneuronen enthalten und insbesondere auch mit der Ausführung von Bewegungen in Verbindung gebracht werden (Rizzolatti & Craighero, 2004; siehe Kap. 1.4). Dass die motorisch erfahrenen Experten in diesen Studien gleichzeitig auch eine bessere Antizipationsleistung zeigten, unterstützt die Theorie, dass die eigenen motorischen Repräsentationen genutzt werden, um die Effekte von beobachteten Bewegungen vorherzusagen. Weitere Unterstützung kommt von einer Verhaltensstudie aus dem Bereich der Expertiseforschung, die ebenfalls ergab, dass motorisch und visuell erfahrene Experten eine bessere Antizipationsleistung zeigen als Probanden, die lediglich über visuelle Expertise verfügen (Cañal-Bruland et al., 2012, siehe Kap. 1.2.4).

Ob Experten einer Sportart auch bei der Antizipation in anderen Sportarten von ihren erworbenen motorischen Repräsentationen profitieren und sie ihre Antizipationsfähigkeiten auch auf andere Situationen transferieren können, wurde bisher von keiner Studie adressiert. So wurde bisher noch nicht untersucht, ob es bei Experten während der Effektantizipation in einer Sportart, für die sie keine Expertise besitzen, zu einer vergleichbaren Aktivierung des

AON kommt. Aglioti und Kollegen (2008) benutzten bei ihrer Studie zur Untersuchung der expertiseabhängigen Antizipationsfähigkeiten von Basketballexperten die Antizipation von Schüssen im Fußball als Kontrollbedingung. Dabei zeigten die Basketballexperten nur bei der Antizipation der Freiwürfe eine spezifische Veränderung der kortikalen Erregbarkeit der Repräsentation der Fingermuskulatur (siehe oben). Es ist jedoch zu beachten, dass Fingerbewegungen in der Fußballbedingung keinen leistungsbestimmenden Aspekt darstellen und die Aussagekraft der Ergebnisse bezüglich eines möglichen Transfers der Antizipationsfähigkeiten daher beschränkt ist. Des Weiteren berichten Aglioti und Kollegen (2008) keine Verhaltensdaten der Kontrollbedingung, so dass hier ein Vergleich zwischen den beiden Sportarten nicht möglich ist. Im Bereich der klassischen Expertiseforschung wurde bisher nur eine Studie zum Transfer der Antizipationsfähigkeit durchgeführt (Schorer, 2007) (siehe Kap. 1.2.4). Schorer (2007) verglich in seiner Untersuchung die Antizipationsleistung von erfahrenen Handballtorhütern, Fortgeschrittenen und Novizen während der Vorhersage von Handballsiebenmetern mit Hockeysiebenmetern. Dabei unterschieden sich die Handballexperten bei der Vorhersage der Hockeysiebenmeter weder in Bezug auf die Anzahl der korrekten Antworten, noch in Bezug auf die Reaktionszeit von den beiden anderen Probandengruppen.

1.5.5 Neuronale Implementierung der internen Modelle in den Arealen des Action Observation Networks

Wie bereits im Kapitel zur Funktion der Predictive Coding und Direct Matching Theorien beschrieben wurde, ist davon auszugehen, dass während der Effektvorhersage eine Simulation der beobachteten Bewegung in den eigenen motorischen Repräsentationen stattfindet. Als mögliche Erklärung, wie die eigenen motorischen Repräsentationen für die Vorhersage von beobachteten Handlungen genutzt werden und wieso Experten dabei von ihren ausgeprägten motorischen Vorerfahrungen profitieren, diskutieren diverse Autoren die Verwendung von internen Modellen (Gazzola & Keysers, 2009; Kilner et al., 2007; Miall 2003; Shmuelof & Zohary, 2007; Yarrow et al., 2009) (siehe auch Kap. 1.3.2). Lokalisiert werden die internen Modelle im Cerebellum sowie in parietalen und prämotorischen Arealen des AON (Blakemore & Sirigu, 2003; Ito, 2008; Kawato et al., 2003; Miall & King, 2008; Miall et al., 1993; Wolpert et al., 1998a,b; für einen Überblick siehe Miall, 2003). Während der Bewegungsbeobachtung könnten nach Miall (2003) die motorischen Befehle, die zur Simulation der beobachteten Bewegung nötig sind, mithilfe des inversen Modells über einen Pfad ausge-

hend vom STS, über posterior parietale Strukturen und insbesondere das Cerebellum, hin zum PMC ermittelt werden. Die Vorhersage des zu erwartenden Effekts durch das Vorwärtsmodell wird dann über eine entgegengesetzte Verbindung des PMC, mit dem Cerebellum, posterior parietalen Arealen sowie dem STS, ausgehend vom PMC, realisiert (Miall, 2003). Das Cerebellum wird dabei von vielen Autoren als wichtigste Struktur für die internen Modelle angesehen (Blakemore & Sirigu, 2003; Ito, 2008; Kawato et al., 2003; Miall & King, 2008; Miall et al., 1993; Wolpert et al., 1998b). Dies wird beispielsweise durch Studien belegt, die zeigen konnten, dass Patienten mit Läsionen im Cerebellum im Gegensatz zu gesunden Probanden nicht in der Lage sind die Kraft ihrer Greifbewegung auf das antizipierte Gewicht des Objekts anzupassen (Müller & Dichgans, 1994; Serrien & Wiesendanger, 1999). In einer Studie von Kawato und Kollegen (2003) resultierte die Antizipation der benötigten Kraft einer Greifbewegung in einer signifikanten Aktivierung von cerebellären Strukturen.

Trotz der Auffassung zahlreicher Autoren, dass interne Modelle auch bei der Effektivvorhersage beobachteter Handlungen eine wichtige Rolle spielen, hat keine der bisherigen fMRT-Studien zur Untersuchung der Antizipation von Handlungseffekten einen besonderen Fokus auf Aktivierungen des Cerebellums gelegt (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011).

1.6 Fragestellung der vorliegenden Arbeit

Die Vorhersage von Handlungseffekten ist in vielen Sportarten ein leistungsbestimmender Faktor. Dies gilt insbesondere für Disziplinen, in denen die Athleten unter großem Zeitdruck auf Aktionen ihrer Mit- und Gegenspieler reagieren müssen. So muss sich der Returnspieler im Tennis bereits für eine angemessene Reaktion entscheiden bevor der Schläger des aufschlagenden Spielers den Ball trifft, da er sonst nicht genügend Zeit hätte, um seine Reaktion rechtzeitig auszuführen (Williams et al., 2011). Bereits 1987 konnten Abernethy und Russell in einer Studie mit Badmintonexperten und Novizen zeigen, dass Experten besser dazu in der Lage sind, die Richtung des beobachteten Schlags vorherzusagen. In den darauffolgenden drei Jahrzehnten machten zahlreiche Studien in diversen Sportarten deutlich, dass die besseren Leistungen bei der Vorhersage von Handlungseffekten ein wichtiger Bestandteil des Unterschieds zwischen Experten und Novizen einer Disziplin sind (für einen Überblick siehe Williams et al., 2011). Gleichzeitig stellen diese Ergebnisse den ersten von drei Analyseschritten zur systematischen Untersuchung von Expertiseleistungen gemäß des Expert Performance Approachs von Ericsson und Smith (1991) dar. Nach diesem besteht die Aufgabe zu Beginn

darin, die Fähigkeiten, die die Expertise des Athleten ausmachen, zu identifizieren, um dann im zweiten Schritt die Mechanismen zu bestimmen, die solchen Expertenleistungen zu Grunde liegen. Im dritten Schritt gilt es dann die Voraussetzungen und Erfahrungen abzubilden, die bei der Entwicklung dieser Mechanismen und damit bei der Entwicklung der Expertise eine Rolle spielen. Zwar konnten beispielsweise durch den Einsatz von PL-Stimuli und Eye-Tracking-Techniken Hinweise gefunden werden, dass Experten bei der Effektvorhersage insbesondere kinematische Informationen nutzen sowie im Vergleich zu Novizen auf eine andere Wahrnehmungsstrategie zurückgreifen (siehe beispielsweise Huys et al., 2009; Ward et al., 2002), jedoch sind die neuronalen Prozesse, die einer solchen Expertiseleistung zugrunde liegen, weitestgehend ungeklärt. Somit ist eine wesentliche Frage bezüglich der Mechanismen der Antizipation von Handlungseffekten nach wie vor unbeantwortet. Wie von Williams und Ericsson (2005) vorgeschlagen, ist die funktionelle Magnetresonanztomographie gut geeignet, um die expertisebedingten Unterschiede der neuronalen Prozesse während der Effektvorhersage zu ermitteln und damit Erkenntnisse hinsichtlich des zweiten Analyseschritts des Expert Performance Approachs zu gewinnen.

Sowohl die Common Coding Theorie von Prinz (1997) und Hommel (2001) als auch die Autoren zahlreicher neurowissenschaftlicher Studien gehen davon aus, dass Wahrnehmung und Handlung eng miteinander verknüpft sind und eigene motorische Repräsentationen auch für die Wahrnehmung von beobachteten Bewegungen genutzt werden. Hinweise darauf kommen insbesondere von Studien die zeigen konnten, dass die Beobachtung von Bewegungen, deren Ausführung von den Beobachtern beherrscht wird, zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON führt (Calvo-Merino et al., 2005,2006; Cross et al., 2009). Das AON setzt sich unter anderem aus dem IFG, dem PMC, dem SMA, dem IPL, dem SPL und dem Cerebellum zusammen (Caspers et al., 2010) und wird nach Ansicht vieler Autoren während der Handlungsbeobachtung genutzt, um die beobachtete Handlung intern zu simulieren (für einen Überblick siehe Zentgraf et al., 2011). Auf diese Weise ist der Beobachter in der Lage, den Effekt der Handlung vorherzusagen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen den eigenen motorischen Repräsentationen und der Aktivität des AON während der Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen zu gewinnen. Dabei stellt der Vergleich zwischen Experten und Novizen eine hervorragende Möglichkeit dar, um den Einfluss der eigenen motorischen Repräsentationen auf die Effektantizipation zu untersuchen. Weiterhin hat der Vergleich zwischen diesen beiden Gruppen das Ziel, die expertisebedingten Unter-

schiede hinsichtlich der neuronalen Prozesse während der Vorhersage von Handlungseffekten zu ermitteln und so weitere Erkenntnisse über die Mechanismen der besseren Antizipationsleistung von Experten zu gewinnen. Im ersten Experiment sollen darüber hinaus die Auswirkungen von unterschiedlichen Antwortbedingungen auf die Aktivierung des AON untersucht werden. Ausgehend von der Frage, ob Experten ihre Antizipationsfähigkeiten auf eine andere Sportart transferieren können und somit ihr Vorhersagenetzwerk auch für andere Disziplinen nutzen, kommen im zweiten Experiment zwei unterschiedliche Expertisegruppen zum Einsatz. Beide Studien betrachten somit neben der Fragestellung, inwiefern die AON-Aktivierung bei der Antizipation von Handlungseffekten von der Expertise des Beobachters beeinflusst wird, weitere Aspekte der Effektantizipation, die bisher nicht untersucht wurden.

2 Experiment 1 – Effektantizipation von Tennisexperten und -novizen²

2.1 Fragestellung

Für die Beobachtung von Bewegungen konnten Zentgraf und Kollegen bereits 2005 zeigen, dass die Aktivierung des AON trotz identischer Stimuli durch verschiedene Instruktionen beeinflusst werden kann. So ergaben die Instruktionen zur anschließenden Vorstellung der Bewegung sowie zur anschließenden Bewertung der Bewegungsausführung eine stärkere Aktivierung in unterschiedlichen Teilen des SMA. Nach Ansicht der Autoren hat die Instruktion und damit das Ziel der Bewegungsbeobachtung einen Top-Down-Einfluss auf die Aktivierung der eigenen motorischen Repräsentationen während der Bewegungsbeobachtung. Zusätzlich konnte eine Studie von Farrow und Abernethy (2003) auf Verhaltensebene zeigen, dass die Art der Antwort bei der Antizipation von Tennisaufschlägen einen Einfluss auf die Antizipationsleistung hatte und dieser Einfluss von der Expertise der Probanden abhängig war. So waren Tennisexperten besser in der Lage die Schlagrichtung vorherzusagen, wenn sie ihre Antwort nicht verbal sondern in Form einer tennisspezifischen Returnbewegung gaben. Die Autoren schlussfolgerten aus diesen Ergebnissen, dass der Unterschied in der Antizipationsleistung zwischen Experten und Novizen durch eine realitätsferne Antwortbedingung unterschätzt wird und die unterschiedliche Kopplung von Wahrnehmung und Handlung in Folge der verschiedenen Antwortbedingungen die Prozesse der Wahrnehmung beeinflusst.

Experiment 1 soll ermitteln, ob unterschiedliche Instruktionen auch einen Einfluss auf die Aktivierung des AON haben, wenn das Ziel der Bewegungsbeobachtung darin besteht, den Effekt der beobachteten Handlung zu antizipieren. Mit der Verwendung von unterschiedlichen Antwortbedingungen, die durch die verschiedenen Instruktionen vorgegeben werden, wird außerdem der Forderung von Farrow und Abernethy (2003) nach validen Untersuchungsbedingungen Rechnung getragen und deren Einfluss auf die Aktivierung des AON untersucht. Um den Einfluss von unterschiedlichen Antwortbedingungen auch in Abhängigkeit der Expertise zu ermitteln, findet in der Studie ein Vergleich zwischen Novizen und Tennisexperten statt. Diese beobachten Tennisschläge, die zum Zeitpunkt des Ball-Schläger-

² Balser, Lorey, Pilgramm, Stark, Bischoff, Zentgraf, Williams & Munzert (2014): Prediction of human actions: Expertise and task-related effects on neural activation of the action observation network. Human Brain Mapping, angenommen.

Kontakts gestoppt werden. Dabei sind die Probanden entweder instruiert die Flugrichtung des geschlagenen Balls oder die eigene Reaktion auf die beobachtete Schlagbewegung vorherzusagen, wobei die Stimuli in beiden Antwortbedingungen identisch sind. Zusätzlich wird eine Kontrollbedingung eingesetzt, die eine Instruktion zur reinen Bewegungsbeobachtung enthält. Durch den Kontrast mit den Bedingungen zur Vorhersage der Schlagrichtung kann die Beobachtungsbedingung genutzt werden, um die neuronalen Prozesse, die mit der Effekttantizipation assoziiert sind, zu isolieren. Nach Schubotz (2007) werden die eigenen motorischen Repräsentationen, insbesondere der PMC, auch zur Vorhersage von nicht-biologischen Ereignissen genutzt. Um zu untersuchen, ob eine mögliche stärkere Aktivierung des AON der Experten spezifisch bei der Antizipation innerhalb der eigenen Disziplin auftritt, kommt eine weitere Antizipationsbedingung zum Einsatz, in der die Probanden die Trajektorie einer Kugel vorhersagen müssen.

2.2 Hypothesen

Auf der Ebene der behavioralen Daten ist aufgrund der Ergebnisse der zahlreichen Expertisevergleiche (Williams et al., 2011) zu erwarten, dass die Tennisexperten im Vergleich zu den Novizen eine signifikant bessere Antizipationsleistung zeigen. Gemäß der Studie von Farrow & Abernethy (2003) sollte der Unterschied in der Vorhersageleistung zwischen den beiden Gruppen dann besonders groß sein, wenn die Probanden ihre eigene Reaktion auf die beobachtete Handlung (Vorhand oder Rückhand) vorhersagen müssen.

Wie unter anderem Abreu et al. (2012) sowie Avenanti et al. (2013) zeigen konnten, spielt das AON während der Vorhersage von Handlungseffekten eine wichtige Rolle. Daher ist unabhängig von der Expertise der Probanden zu erwarten, dass die Vorhersage der Tennisstimuli im Vergleich zur Beobachtung der Kontrollbedingung zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON führt. Diverse Autoren gehen davon aus, dass die internen Modelle nicht nur der Ausführung eigener Bewegungen dienen, sondern dass diese auch während der Beobachtung von Bewegungen verwendet werden, um den Effekt der Handlungen vorherzusagen (siehe beispielsweise Gazzola & Keysers, 2009; Miall, 2003; Yarrow et al., 2009). Zusammen mit den Ergebnissen der Studien von Calvo-Merino et al. (2006) und Cross et al. (2009) lässt diese Theorie erwarten, dass die Beobachtung der Tennisstimuli mit dem Ziel der Effektvorhersage bei den Tennisexperten im Vergleich zu den Novizen zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON, insbesondere des PMC, des IPL sowie des Cerebellums (Miall, 2003), führt.

In bisherigen fMRT-Studien zur Untersuchung der Antizipation von Handlungseffekten hatten die Probanden die Aufgabe den Effekt der beobachteten Handlung zu bestimmen und nicht die Aufgabe ihre eigene Reaktion auf die beobachtete Handlung vorherzusagen, wie es viele Situationen im Sport jedoch verlangen (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011). In Experiment 1 wird daher untersucht, ob die unterschiedlichen Antwortbedingungen die Aktivierung in Arealen des AON beeinflussen. Der Bezug auf die eigene Reaktion könnte zu einer stärkeren Aktivierung der eigenen motorischen Repräsentationen führen, insbesondere bei den Tennisexperten. Eine alternative Hypothese ist jedoch, dass es nur bei den unerfahrenen Novizen zu einem Aktivierungsunterschied in Folge der Antwortbedingungen kommt, weil Experten möglicherweise in beiden Bedingungen einen Bezug zur eigenen Reaktion herstellen, da sie dies in der Praxis über Jahre hinweg trainiert haben.

2.3 Methode

2.3.1 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen an der vorliegenden Studie 33 Personen teil. Eine Probandin wurde jedoch nachträglich von der Analyse der Daten ausgeschlossen, da sowohl die Nachbefragung als auch die Verhaltensdaten dieser Probandin auf eine nicht korrekte Bearbeitung der Versuchsbedingungen hingewiesen hatten. Keiner der Teilnehmer hatte zum Zeitpunkt der Studiedurchführung oder in der Vergangenheit eine neurologische oder psychiatrische Erkrankung. Gemäß des Edinburgh Inventory of Handedness (Oldfield, 1971) zeigten alle Probanden eine dominante Nutzung der rechten Hand. Die Stichprobe der Studie setzte sich aus 16 Tennisexperten sowie 16 Tennisonovizen zusammen, wobei beide Untergruppen jeweils zur Hälfte aus männlichen und weiblichen Teilnehmern bestanden. Das Durchschnittsalter der Tennisonovizen lag bei 25.38 Jahren ($SD = 3.88$). Von diesen 16 unerfahrenen Probanden hatte keiner zuvor im Verein Tennis gespielt. Die Gruppe der Tennisexperten setzte sich hingegen aus Spielern der vier höchsten deutschen Tennisligen zusammen, die ein durchschnittliches Trainingspensum von 4.6 Einheiten pro Woche ($SD = 2.16$) hatten. Mit einem durchschnittlichen Trainingsalter von 16 Jahren ($SD = 5.73$) hatten die Tennisexperten in ihrer bisherigen Karriere im Mittel 534 Wettkampfspiele ($SD = 300$) absolviert. Das Lebensalter unterschied sich mit 22.56 Jahren ($SD = 5.11$) nicht signifikant von der Novizengruppe ($t_{Alter(30)} = 1.75$, $p = .09$). Unter den Tennisexperten fanden sich zusätzlich auch zwei Spieler, die Tennis professionell als Beruf ausübten. Entlohnt wurden die Teilnehmer entweder mit Versuchsperso-

nenstunden oder einer monetären Aufwandsentschädigung. Die Studie wurde von der lokalen Ethikkommission des Fachbereichs für Psychologie und Sportwissenschaft der Justus-Liebig-Universität genehmigt. Alle Probanden gaben ihr schriftliches Einverständnis für die Teilnahme an der Studie gemäß der Vereinbarung von Helsinki.

2.3.2 Stimulusmaterial

Für die vorliegende Studie wurden 48 Vorhandschläge sowie 24 Ballprell-Bewegungen (*Reine Beobachtungsbedingung*) im Tennis aufgezeichnet. Zusätzlich wurden 24 Videoclips von einem animierten Objekt, ohne menschlichen Akteur, erstellt. Bei der Aufzeichnung der Tennisstimuli kamen eine Spielerin und ein Spieler aus dem mittleren Leistungsniveau (Verbandsliga/Gruppenliga) zum Einsatz. Diese waren, genau wie alle 32 teilnehmenden Probanden, rechtshändig. Die Aufzeichnung der Tennisstimuli fand in einer Tennishalle statt, die auch zur Austragung von Wettkampfspielen genutzt wird. Die Videokamera (Canon XM 2) wurde mittig zwei Meter hinter dem Tennisnetz positioniert, so dass der Bildausschnitt den Blickwinkel eines Gegenspielers simuliert, der sich am Netz befindet um auf den beobachteten Schlag mit einem Volley zu reagieren (siehe Abb. 1A). Der Ball wurde von einem weiteren Spieler (auf den Videoaufnahmen nicht zu sehen) durch einen Vorhandschlag ins Spiel gebracht, woraufhin sich der Spieler in Richtung des Balls bewegte, um einen Vorhandschlag auszuführen. Für die Aufnahmen wurden in der Spielfeldhälfte, in welcher auch die Videokamera platziert war, Zielzonen (3×1 m) markiert. Welche der beiden Zielzonen zu treffen war, wurde den Spielern vor jedem Schlag durch den Aufnahmeleiter mitgeteilt. Bei der späteren Versuchsdurchführung wurden dann lediglich Videoclips von erfolgreichen Schlägen in diese beiden Zielzonen verwendet. Wie auf der schematischen Abb. 2 zu sehen ist, waren diese so gewählt, dass die Spieler Vorhandschläge in die linke und rechte Ecke des Spielfeldes ausführen mussten. Die Verteilung von Schlägen nach links und rechts war dabei mit jeweils 24 Schlägen ausgeglichen. Da jeder Vorhandschlag in zwei unterschiedlichen Instruktionsbedingungen bei identischem Bildmaterial präsentiert wurde, verdoppelte sich die Anzahl der Vorhandschläge auf 96. Alle Videoclips der Tennisschläge wurden zum Zeitpunkt des Ball-Schläger-Kontakts gestoppt. Es war demnach keine Information über die Flugbahn des Balles verfügbar.



Abb. 1 Beispielhafte Darstellung der Videostimuli aller drei Bedingungen. (A) Vorhandschlag des männlichen Modells (*Motorische und Räumliche Antizipationsbedingung*). (B) Weibliches Modell beim Ballprellen mit dem Tennisschläger (*Reine Beobachtungsbedingung*). (C) Gelber Ball, der sich auf einer sinusförmigen Trajektorie nach unten bewegt und zu einem zufälligen Zeitpunkt verschwindet (*Nur Ball Antizipationsbedingung*). Die eingezeichnete Trajektorie in grau dient lediglich der Illustration und war für die Versuchsteilnehmer nicht zu sehen (Balsler et al., 2014).

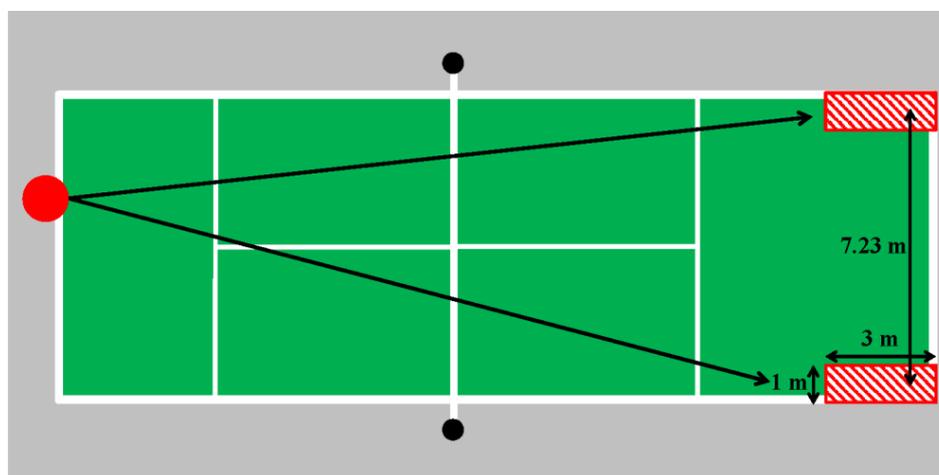


Abb. 2 Schematische Darstellung der Zielzonen, die von den Modellen getroffen werden mussten. Es wurden ausschließlich Treffer dieser Zonen als Stimuli für die Antizipationsbedingungen im Tennis verwendet.

Bei gleichen Aufnahmebedingungen wurden 24 Videoclips erstellt, die jeweils einen der beiden Spieler beim Ballprellen zeigten. Die Spieler standen hierzu mittig an der Grundlinie des Feldes und prellten den Ball mit dem Tennisschläger, den sie in ihrer rechten Hand hielten. Um neuronale Aktivierung, die durch die Wahrnehmung von Gesichtern verursacht wird, zu vermeiden, wurden die Gesichter in allen Tennisclips mithilfe von Adobe Premiere (Adobe Systems Software Ireland Limited, Dublin, Ireland) maskiert und mit einer Unschärfe versehen. Durch die verwendete Unschärfe wurden die Texturen der Gesichter auf möglichst unauffällige Art und Weise entfernt. Zusätzlich zu den insgesamt 120 Tennisclips kamen 24 Stimulusvideos zum Einsatz, die lediglich einen gelben, animierten Ball und somit keine menschliche Bewegung zeigten. Dieser Ball bewegte sich auf einer vertikalen, sinusförmigen Trajektorie um eine vertikale Linie herum von oben nach unten und verschwand zu einem

zufälligen Zeitpunkt. Sowohl dieser Zeitpunkt des Verschwindens des Balls, als auch der Startpunkt sowie die Breite der Sinuskurve variierten zwischen den 24 Videoclips. Entgegen der Abb. 1C war die Trajektorie des Balls im Videoclip nicht eingezeichnet. Dies dient ausschließlich der Illustration. Erstellt wurden die Videoclips mithilfe von Microsoft PowerPoint (Microsoft Office Suite 2003, Redmond, USA). Im gesamten Experiment wurden 144 Stimulusvideos mit einer Länge zwischen 2.1 und 3.0 s verwendet. Die Variation in der Dauer der Videos lag dabei insbesondere in der unterschiedlichen Bewegungsdauer der Tennisspieler in den einzelnen Videoclips begründet. Alle Stimuli wurden in einer Auflösung von 720×576 Pixeln mit 25 Bildern pro Sekunde über einen LCD-Projektor (Epson EB-G5600) im Nebenraum auf eine 460×350 mm große Leinwand projiziert, welche am Kopfende des Kernspintomographen positioniert war. Mithilfe eines Doppelspiegels, der an der Kopfspule befestigt war, konnten die Versuchsteilnehmer die Projektionsfläche trotz ihrer liegenden Position einsehen. Das visuelle Feld betrug dabei 188 mm in horizontaler und 168 mm in vertikaler Ausrichtung, was einem Blickwinkel von 18° respektive 11° entsprach. Zur Steuerung des Experimentalablaufs sowie zur Präsentation der Stimuli wurde die Software Presentation (Version 12.9, Neurobehavioral Systems, Albany, USA) verwendet.

2.3.3 Aufgabe und Instruktionen

Die Probanden hatten im Laufe des Experiments die Aufgabe auf vier unterschiedliche Versuchsbedingungen zu reagieren. In der *Räumlichen Antizipationsbedingung* beobachteten die Probanden Vorhandschläge der beiden Tennisspieler mit der Aufgabe, die Schlagrichtung zu antizipieren und daraufhin die erwartete Flugrichtung des Balls anzugeben. Ihre Antwort gaben sie dabei mit der linken und rechten Taste einer mit zwei Knöpfen ausgestatteten Antwortbox. Die linke Taste entsprach bei dieser Bedingung einem Ball, der in die linke Ecke flog, die rechte Taste einem Ballflug in die rechte Ecke des Spielfeldes. In der *Motorischen Antizipationsbedingung* beobachteten die Probanden die exakt gleichen 48 Stimuli wie in der *Räumlichen Antizipationsbedingung*, hatten hier jedoch die Aufgabe die Schlagrichtung zu antizipieren und anschließend eine eigene, angemessene motorische Reaktion auszuwählen. Die Probanden konnten dabei zwischen einem Vorhand- und einem Rückhandschlag wählen. Für den Fall, dass sie auf den beobachteten Schlag mit einem Vorhandschlag reagiert hätten drückten sie die rechte Taste, bei einem Rückhandschlag entsprechend die linke Taste. Demnach entsprach eine korrekte Vorhand-Antwort in der *Motorischen Antizipationsbedingung* einer korrekten Entscheidung für die rechte Ecke in der *Räumlichen Antizipationsbedingung*.

In beiden Tennisantizipationsbedingungen wurden die Probanden, passend zur Ersten-Personen-Perspektive der Videoaufnahmen, dazu aufgefordert sich in die Rolle des Gegenspielers am Netz hineinzusetzen. Diese Instruktion wurde genutzt um zu verhindern, dass die teilnehmenden Tennisexperten bei der Antizipation der eigenen Antwort einen sogenannten Inside-Out-Schlag in Erwägung ziehen. Bei diesem Schlag umläuft der Spieler einen Ball, der sich auf seiner Rückhandseite befindet, und kann den Ball stattdessen mit der zumeist stärkeren Vorhand spielen. Um auszuschließen, dass bei einem Ball auf die Rückhandseite nicht nur die Antwort Rückhand, sondern auch die Antwort Vorhand korrekt ist, wurde die Position am Netz gewählt, da Inside-Out-Schläge nur an der Grundlinie und nicht am Netz in Form eines Volleys gespielt werden.

Um den Effekt der visuellen Stimulation, der Beobachtung einer biologischen Bewegung und des Tastendrucks auf die neuronale Aktivierung zu kontrollieren, wurde eine *Reine Beobachtungsbedingung* eingesetzt. Diese beinhaltete Bewegungen der gleichen Tennismodelle bei identischem Bildausschnitt und Hintergrund und erforderte ebenfalls einen Tastendruck am Ende des Videoclips. Die Probanden hatten dabei die Aufgabe, die Spieler beim Ballprellen zu beobachten und direkt nach dem Videoclip die linke oder rechte Taste zu drücken. Welche der beiden Tasten zu drücken war, wurde vor jedem Block, bestehend aus sechs Videoclips der *Reinen Beobachtungsbedingung*, durch einen entsprechenden Instruktionstext vorgegeben. In der zusätzlichen *Nur Ball Antizipationsbedingung* hatten die Probanden die Aufgabe einen gelben Ball, der sich auf einer sinusförmigen Bewegungsbahn von oben nach unten bewegte, zu beobachten. Dabei kreuzte der Ball wiederholt eine weiße vertikale Linie, die vor dem grünen Hintergrund zu sehen war. Die Probanden wurden instruiert die Trajektorie des plötzlich verschwindenden Balls zu interpolieren und auf Basis dessen zu antizipieren, ob der Ball eine horizontale Linie, die sich am unteren Ende der vertikalen Linie befand, links oder rechts dieser vertikalen Mittellinie schneidet. Auch in dieser Bedingung erfolgte die Eingabe der Antwort über die linke und rechte Taste der Antwortbox. Demnach erforderten alle vier Versuchsbedingungen eine motorische Antwort im Anschluss an das jeweilige Stimulusvideo. Die Verteilung der erforderten, korrekten Reaktionen war in allen vier Bedingungen mit 50 % links und 50 % rechts ausgeglichen. Die exakten Instruktionen, die den Probanden im Kernspintomographen präsentiert wurden, sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1 Instruktionen der vier verschiedenen Experimentalbedingungen in Experiment 1.

Bedingung	Instruktion
<i>Räumliche Antizipationsbedingung</i>	„Wohin wird der beobachtete Ball fliegen? In die linke oder rechte Ecke des Spielfeldes? Drücken Sie nach dem Video die linke oder rechte Taste“
<i>Motorische Antizipationsbedingung</i>	„Wie würden Sie auf den beobachteten Schlag reagieren? Mit einem Vorhand- oder mit einem Rückhandschlag? Drücken Sie nach dem Video die linke oder rechte Taste“
<i>Reine Beobachtungsbedingung</i>	„Beobachten Sie den Tennisspieler beim Ballprellen! Drücken Sie nach dem Video die linke Taste!“ „Beobachten Sie den Tennisspieler beim Ballprellen! Drücken Sie nach dem Video die rechte Taste!“
<i>Nur Ball Antizipationsbedingung</i>	„Wo wird sich der beobachtete Ball auf Höhe der horizontalen Linie befinden? Rechts oder links von der Mitte? Drücken Sie nach dem Video die linke oder rechte Taste“

2.3.4 Versuchsablauf

Die Untersuchung wurde im Bender Institute of Neuroimaging (BION) der Justus-Liebig-Universität Gießen durchgeführt. Zu Beginn wurde den Versuchsteilnehmern ein allgemeines Informationsblatt zur Studie, ein Informationsblatt zur kernspintomographischen Messung, ein Fragebogen zur Händigkeit (Edinburgh Handedness Inventory; Oldfield, 1971) sowie ein Fragebogen zu demographischen Angaben und zur Tennisexpertise ausgehändigt. Letzterer umfasste neben Angaben zu Alter und Beruf unter anderem Fragen zur Tenniserfahrung in Jahren, als auch zum wöchentlichen Trainingspensum, zur aktuellen und höchsten Spielklasse sowie zur Anzahl der absolvierten Wettkampfspiele, für den Fall, dass die Probanden zur Gruppe der Tennisexperten gehörten. Die Probanden wurden darüber informiert, dass sie die Untersuchung jederzeit abbrechen könnten, ohne dass durch diesen Abbruch negative Konsequenzen für sie entstehen würden. Wenn die Probanden schriftlich in die Teilnahme einwilligten und keine Kontraindikation bezüglich der kernspintomographischen Messung vorlag,

wurden die Probanden über den Versuchsablauf informiert. Die vier unterschiedlichen Experimentalbedingungen sowie die dazugehörigen Instruktionen wurden unter Verwendung von Beispielfideos und schematischen Abbildungen erklärt und in einem abschließenden Training von den Probanden geübt. Dabei absolvierten diese zwei Trials zu jeder Bedingung, um sich mit dem Ablauf, den Stimuli und der Antwortgabe vertraut zu machen. Das Stimulusmaterial der Trainingsphase war bei allen Versuchsteilnehmern identisch und wurde nicht im späteren fMRT-Experiment verwendet. Die Antworttastatur am Trainingscomputer entsprach der im Kernspintomographen genutzten Apparatur. Waren die Probanden Brillen- oder Kontaktlinsenträger, wurde ihnen im Anschluss an die Trainingsphase ein MRT-taugliches Brillengestell zur Verfügung gestellt, das über austauschbare Gläser an die jeweilige Sehschwäche angepasst werden konnte.

Während der funktionellen Magnetresonanztomographie absolvierten die Versuchsteilnehmer 144 Trials, was bei einer durchschnittlichen Trialdauer von 14 s zu einer Experimentaldauer von 35 min führte. Jeder Trial begann dabei mit einem einsekündigen schwarzen Bildschirm, gefolgt von einem weißen Fixationskreuz auf schwarzem Hintergrund für weitere 5 s. Das anschließend präsentierte Stimulusvideo hatte eine Länge zwischen 2.1 und 3.0 s. Direkt nach der Präsentation des Videos wurde der Bildschirm schwarz und die Probanden hatten ab diesem Zeitpunkt 3 s Zeit, um ihre Antwort durch Drücken der linken oder rechten Taste der Antworttastatur mit ihrem Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand zu geben. Sobald eine Taste gedrückt wurde, wurde die gegebene Antwort für die verbleibende Zeit der dreisekündigen Antwortphase auf dem Bildschirm angezeigt. Rückmeldung über ihre Leistung erhielten die Probanden hingegen erst nach Abschluss des Experiments in Form eines Durchschnittswerts für jede der vier Experimentalbedingungen. Um zu verhindern, dass sich die Probanden bei jedem Trial auf eine neue Instruktion einstellen müssen, wurden die 144 Trials in 24 Miniblocks aufgeteilt. Vor jedem Miniblock erhielten die Probanden für 8 s die Instruktion passend zu einer der vier Experimentalbedingungen als Text auf dem Bildschirm, gefolgt von jeweils sechs Trials derselben Bedingung und einem 3-sekündigen schwarzen Bildschirm am Ende jedes Miniblocks. Die Miniblocks wurden weiterhin in vier große Blocks aufgeteilt, wobei jeder Block zwei Miniblocks der *Motorischen Antizipationsbedingung*, zwei Miniblocks der *Räumlichen Antizipationsbedingung*, einen Miniblock der *Reinen Beobachtungsbedingung* und einen Miniblock der *Nur Ball Antizipationsbedingung* enthielten. Auf diese Weise konnte ausgeschlossen werden, dass es durch Zufall zu einer ungewollten Häufung einer Instruktionsbedingung kommt. Sowohl die Reihung der Miniblocks innerhalb der vier

großen Blocks, als auch die Aufteilung der Trials auf die 24 Miniblocks erfolgte randomisiert (zum Ablauf der Messung siehe auch Abb. 3).

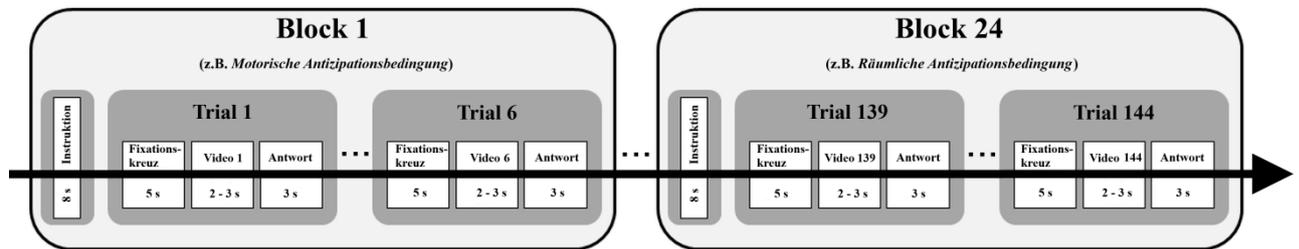


Abb. 3 Aufbau und Ablauf der 144 Experimentaltrials. Jeder der 24 Miniblocke setzte sich aus sechs Trials einer Versuchsbedingung zusammen und begann mit einem Instruktionsschirm. Die sechs Trials starteten jeweils mit der Präsentation eines Fixationskreuzes, gefolgt von einem Videostimulus und der anschließenden Antwortphase. Sowohl die Verteilung der Miniblocke als auch der Videostimuli erfolgte dabei für alle Probanden randomisiert (Balsler et al., 2014; Beschriftung geändert).

2.3.5 Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der Verhaltensdaten

Die Antworten der Probanden während der funktionellen Magnetresonanztomographie wurden zusammen mit der jeweiligen Zeit sowie der vorangegangenen Art der Stimulation von der Experimentalsoftware Presentation in einer Datei gespeichert. Mithilfe eines selbst programmierten Scripts für das Softwarepaket MATLAB (Version 7.7, Mathworks Inc., Sherborn, USA) konnte dann im Anschluss die Anzahl an korrekten und inkorrekten Antworten für die vier unterschiedlichen Experimentalbedingungen sowie die Antwortzeit für jede einzelne Antwort berechnet werden. Die Antwortzeit war dabei als die Zeitspanne zwischen dem Ende eines Videoclips und dem aufgezeichneten Tastendruck definiert. Um den Einfluss der Expertise und der Antwortbedingung auf die Anzahl der korrekten Antworten zu untersuchen, wurde unter Verwendung der Software SPSS (Version 18, SPSS Inc., Chicago, USA) eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Expertiseniveau (Novize, Experte) und Antwortbedingung (*Motorische Antizipationsbedingung*, *Räumliche Antizipationsbedingung*) mit Messwiederholung auf dem Faktor Antwortbedingung gerechnet. Die gleiche Analyse kam weiterhin auch zur Berechnung des Einflusses der beiden Faktoren auf die Antwortzeit zum Einsatz. Zusätzlich wurde in beiden Expertisegruppen sowohl für die *Motorische* als auch für die *Räumliche Antizipationsbedingung* durch einen *t*-Test bestimmt, ob die Anzahl korrekter Antworten signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 % lag. Für die *Nur Ball Antizipationsbedingung* wurde ein *t*-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt, um die Anzahl korrekter Antworten der Novizen und der Tennisexperten auf einen signifikanten Unterschied zu überprüfen.

2.3.6 Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der fMRT-Daten

Für die Aufzeichnung der anatomischen und hirnhysiologischen Daten wurde in diesem Experiment ein 1.5 Tesla Kernspintomograph vom Typ Magnetom Siemens Symphony mit Quantum 3-Gradientensystem (Siemens, Erlangen, Deutschland) unter Verwendung einer Standardkopfspule eingesetzt. Die Messung im Kernspintomographen begann mit einer neunsekündigen Localizer-Sequenz, die zur Ausrichtung der Schichtführung und des Field of Views (FoV) für die drauffolgenden Messsequenzen genutzt wurde. Das FoV wurde dabei so gewählt, dass sich insbesondere im Bereich des Frontal- sowie des Parietallappens kein signalgebendes Gewebe außerhalb des FoV befand, wodurch Artefakte aufgrund von Einfaltungen vermieden werden sollten. In den drauffolgenden 6 min wurde die anatomische Messung durchgeführt, auf deren Basis später die funktionellen Daten mit der Anatomie der Probanden koregistriert wurden. Die verwendete MPRAGE-Sequenz (magnetized prepared rapidly acquired gradient echo) war, genau wie die Sequenz des Localizers, T_1 -gewichtet und setzte sich aus 160 Schichtaufnahmen mit einer Dicke von 1 mm, einem FoV von 250 x 250 mm und einer Time of Repetition (TR) von 1.99 s zusammen. Um Verzerrungen der funktionellen Daten, verursacht durch Inhomogenitäten des B_0 -Magnetfeldes des Kernspintomographen, mithilfe des Unwarps im Verlauf des Preprocessings korrigieren zu können, wurde im dritten Schritt eine zweiminütige Fieldmap-Sequenz verwendet, bei der diese Inhomogenitäten des Magnetfelds gemessen wurden.

Auf die drei genannten Vormessungen folgte die fMRT-Messung, bei der eine 2D-Echo-Planar-Single-Shot Sequenz (EPI-Sequenz) von Siemens zum Einsatz kam. Sowohl die Schichtführung als auch das FoV wurden von den vorausgegangenen Messsequenzen übernommen. Während der EPI-Sequenz wurden in dieser Studie insgesamt 842 T_2 -gewichtete Aufnahmen der Gehirnaktivität gemacht, von denen die ersten beiden Aufnahmen jedoch direkt nach der Aufnahme verworfen wurden. Jedes dieser verbleibenden 840 Volumen setzte sich aus 25, in absteigender Reihenfolge aufgezeichneter, Schichtaufnahmen mit einer Dicke von 5 mm und einem Abstand zwischen den Schichten von 1 mm zusammen. Mit einer Bildmatrix von 64×64 und einem FoV von 192×192 mm ergab sich somit eine Voxelgröße von $3 \times 3 \times 5$ mm. Die Time of Echo (TE) betrug 55 ms, der Flip Angle 90° . Eine Time of Acquisition (TA) von 100 ms führte in Kombination mit 25 Schichten pro Volumen zu einer Time of Repetition (TR) von 2.5 s. Bei insgesamt 842 Volumen resultierte daraus eine Gesamtdauer der EPI-Sequenz von 35 min und 5 s. Um eine repräsentativere Abtastung der BOLD-Response über alle Trials zu erreichen, wurde die zeitliche Differenz zwischen der Volumen-

aufzeichnung und dem Zeitpunkt des Trialbeginns mithilfe eines sogenannten Jitters im Bereich von ± 1.25 s ($\pm \frac{1}{2}$ TR) variiert.

Preprocessing

Für das Preprocessing sowie die statistische Auswertung der funktionellen Daten wurde das Softwarepaket SPM8 (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) verwendet. In einem ersten Verarbeitungsschritt wurden daher die Rohdaten mithilfe der Software MRIConvert (Version 2.0, Lewis Center for NeuroImaging, Oregon, USA) in das SPM8-kompatible Dateiformat NIFTI umgewandelt. Um den Einfluss von Bewegungsartefakten, ausgelöst durch Kopfbewegungen der Probanden, zu minimieren wurden zwei Verfahren der Bewegungskorrektur eingesetzt. Langsame Lageveränderungen, wie sie zum Beispiel durch das Absacken des Kopfes im Kissen verursacht werden, wurden unter Verwendung der Realignment-Prozedur von SPM8 korrigiert. Dabei wurden alle Volumen mit der ersten Aufnahme dieser Sequenz verglichen und im Falle einer Abweichung durch eine starre Bewegungskorrektur (rigid-body-transformation) so verschoben, dass sie dem Referenzvolumen entsprachen. Um auch schnelle, ruckartige Kopfbewegungen, verursacht zum Beispiel durch das Schlucken oder eine aktive Lageveränderung des Probanden, zu korrigieren, kam zusätzlich eine Software zur Bewegungskorrektur zum Einsatz, die am eigenen Bender Institute of Neuroimaging entwickelt wurde (sogenannte in-house Software). Die Datenbasis bildete hierbei die bereits mit SPM8 bewegungskorrigierte Datenreihe. Volumen, die eine Kopfbewegung beinhalteten, wurden bei diesem Verfahren identifiziert, indem sie mit dem jeweils vorangegangenen sowie nachfolgenden Volumen verglichen wurden. Dieser Vergleich erfolgte durch die Berechnung des durchschnittlichen, quadrierten Unterschieds zwischen den Volumen. Der geringere Unterschied wurde daraufhin als jeweiliger Ausreißerwert des Volumens verwendet. Der Grenzwert für diese Ausreißerwerte wurde durch eine Berechnung des Interquartilsabstandes bestimmt (unter Korrektur einer asymmetrischen Verteilung der Daten, Hubert & van der Veeken, 2008), der anschließend mit 1.5 multipliziert und zu dem 75. Perzentil addiert wurde. Volumen, die auf diese Weise als Ausreißer identifiziert wurden, wurden während der First-Level-Analyse durch die Verwendung eines zusätzlichen Regressors für dieses Ausreißer-Volumen korrigiert. Beim Unwarping, dem zweiten Schritt des Preprocessings, wurden die Daten der Fieldmap-Messung genutzt, um die Verzerrung der funktionellen Daten zu berichtigen, die aufgrund der Inhomogenität des B_0 -Magnetfeldes während der Messung zustande gekommen waren. Da es bei der Aufzeichnung der 25 Schichten innerhalb eines Volumens zu einer zeitlichen Differenz von 2.4 s zwischen der

ersten und der letzten Schicht kommt, die Schichten in der statistischen Auswertung später jedoch als simultan aufgezeichnete Datenpunkte behandelt werden, ist eine Korrektur der Voxelzeitreihen nötig. Bei der sogenannten Slice-Time-Correction wird dabei eine Referenzschicht sowie deren Aufnahmezeitpunkt definiert, um durch Interpolation die Werte für alle anderen Schichten eines Volumens zu diesem Zeitpunkt zu bestimmen. Bei der vorliegenden Studie wurde die mittlere Schicht 13 als Referenzschicht gewählt. Um die Daten der 32 Versuchspersonen trotz der interpersonellen Varianz bezüglich anatomischer Merkmale des Gehirns in einer Gruppenstatistik vergleichen zu können, mussten die Aufnahmen aller Versuchspersonen mittels Transformation in einen Standardraum überführt werden. Dazu wurden zuerst die funktionellen Aufnahmen an die anatomische Aufnahme der jeweiligen Versuchsperson angepasst und diese wurde dann durch eine zweite Transformation in den MNI- (Montreal Neurological Institute) Standardraum gebracht. Zum Abschluss des Preprocessings wurden die funktionellen Daten, wie von Worsley (2007) empfohlen, mithilfe eines Gaußschen Kernels (Full Width at Half Maximum) mit einer Spannweite von 9 mm in x-, y- und z-Richtung geglättet, um das Signal-zu-Rauschverhältnis zu verbessern.

Für die anatomischen und funktionellen Daten des Cerebellums unterschied sich der Ablauf des Preprocessings in diversen Schritten von der im vorangegangenen Absatz beschriebenen Vorgehensweise für den restlichen Cortex Cerebri. Das gesonderte Preprocessing der cerebellären Daten wurde durchgeführt, da eine herkömmliche Normalisierung der Daten in SPM8 gemäß Diedrichsen (2006) aufgrund des niedrigen Kontrasts des dort verwendeten Templates (ICBM-152-Template) im Bereich des Cerebellums zu einer hohen räumlichen Variabilität zwischen den Versuchspersonen geführt hätte. Um die feinen Strukturen möglichst gut zu bewahren und die interpersonelle Angleichung der Anatomien zu verbessern, wurde für das Cerebellum stattdessen das SUIT-Template verwendet, das in der SUIT-Toolbox für SPM8 (Version 2.5.2, Institute of Cognitive Neuroscience, London, UK) enthalten ist. Das SUIT-Template beruht auf den anatomischen Aufnahmen von 20 gesunden Probanden, die mit einer nicht-linearen Transformation zu einem hochauflösenden Template des Cerebellums und des Hirnstamms verarbeitet wurden. Zusätzlich kommt bei dieser Toolbox ein auf das Template angepasster, nichtlinearer Normalisierungsalgorithmus zum Einsatz, der die Genauigkeit der Normalisierung für cerebelläre Areale im Vergleich zur herkömmlichen SPM8-Variante weiter verbessert (Diedrichsen, 2006) (siehe Abb. 4). In einem ersten Verarbeitungsschritt wurden das Cerebellum sowie der Hirnstamm mithilfe eines in der SUIT-Toolbox ebenfalls enthaltenen Isolationsalgorithmus separiert und im Anschluss für

jede Versuchsperson einzeln per Hand kontrolliert und gegebenenfalls unter Berücksichtigung anatomischer Landmarken korrigiert. Mittels nicht-linearer Transformation wurden die auf diese Weise isolierten Cerebella dann auf das SUI-Template normalisiert. Die dabei gewonnenen Deformationsparameter wurden im nächsten Schritt genutzt, um die funktionellen Daten der Versuchspersonen ebenfalls auf das SUI-Template zu normalisieren. Die funktionellen Daten hatten zuvor nicht nur wie beim herkömmlichen Preprocessing die Schritte Realignment, Unwarping und Slice-Time-Correction durchlaufen, sondern auch die First-Level-Analyse. Um zu verhindern, dass durch die Glättung der Daten Voxel aus superior gelegenen, visuellen Arealen einbezogen werden, wurde die Glättung ebenfalls erst im Anschluss an die Berechnung der First-Level-Analyse durchgeführt. Ab der Second-Level-Analyse wurden die Daten des Cerebellums und des Cortex Cerebri dann auf gleiche Art und Weise analysiert.

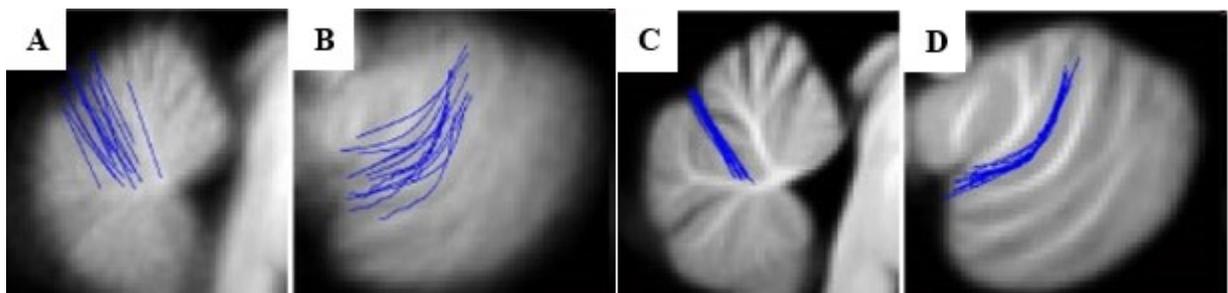


Abb. 4 Vergleich der Normalisierung auf das ICBM-152- (A + B) und das SUI-Template (C + D). Eingezeichnet sind dabei die Positionen der primären Fissur (A + C) sowie der Fissura intraventricularis (B + D) von 16 Probanden (aus Diedrichsen, 2006, mit Erlaubnis des Verlags Elsevier).

First-Level-Analyse

In der First-Level-Analyse wurde der Einfluss der unterschiedlichen Experimentalbedingungen auf die Gehirnaktivität für jede Versuchsperson separat berechnet. Dazu wurde das allgemeine lineare Modell (ALM) angewendet, bei dem die Experimentalbedingungen als Regressoren definiert wurden, um den Einfluss dieser Bedingungen auf die gemessene neuronale Aktivität vorherzusagen. Die neuronale Aktivität wurde während der funktionellen Magnetresonanztomographie in Form der BOLD-Response gemessen und anschließend unter Berücksichtigung der Hemodynamic Response Function an den idealtypischen Verlauf der BOLD-Response angepasst. In der First-Level-Analyse wurde dann überprüft, in welchen Voxeln die gemessene Signalveränderung mit der vorhergesagten Signalveränderung übereinstimmte. Dabei wurden die folgenden Regressoren durch das ALM modelliert und auf ihren Einfluss auf die neuronale Aktivität hin überprüft: Die korrekten und inkorrekten Trials der

vier verschiedenen Experimentalbedingungen (*Motorische Antizipation*, *Räumliche Antizipation*, *Reine Beobachtung*, *Nur Ball Antizipation*; analysiert wurde hierbei jeweils die Phase der Videopräsentation), die Instruktionsphasen, die dreisekündigen Antwortphasen sowie alle Pausen und Fixationsphasen. Zusätzlich wurden die sechs Bewegungsparameter in das ALM als Regressoren eingeführt, die zuvor während des Preprocessings ermittelt worden waren. Durch die Verwendung eines High-Pass-Filters mit einem Grenzwert von 128 s wurden weiterhin sehr langsame Signalveränderungen, wie sie zum Beispiel durch eine Veränderung des Messsignals des Kernspintomographen im Laufe einer EPI-Sequenz entstehen können, entfernt. Der Kontrast zwischen Regressoren ermöglichte dann die Bestimmung der Unterschiede in der neuronalen Aktivität zwischen den verschiedenen Experimentalbedingungen, in der First-Level-Analyse zunächst auf Einzelpersonenebene.

Second-Level-Analyse

In der darauffolgenden Second-Level-Analyse wurden dann sowohl Vergleiche zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Versuchspersonen (One-Sample-*t*-Test) auf Gruppenebene, als auch Vergleiche zwischen den zwei Expertisegruppen (Two-Sample-*t*-Test) durchgeführt. Mit dem Ziel, die Gehirnareale zu identifizieren, die bei allen 32 Versuchspersonen während der Antizipation von Handlungseffekten unabhängig von der Expertise aktiviert sind, wurde zu Beginn ein One-Sample-*t*-Test für den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung* (*Motorische* und *Räumliche Antizipation* zusammen) > *Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden gerechnet. Für diesen Kontrast wurde eine Ganzkopfanalyse mit family-wise-error-Korrektur (FWE) ($p < .05$) gewählt, da der Vergleich der Effektantizipation mit der reinen Bewegungsbeobachtung in beiden Antwortbedingungen zusammen für alle 32 Probanden sehr starke Aktivierungsunterschiede erwarten ließ. Eine konservative Ganzkopfauswertung mit einer Signifikanzschwelle von $p < .05$, unter Anwendung einer FWE-Korrektur auf den gesamten Cortex Cerebri beziehungsweise auf die im SUIT-Template enthaltenen Voxel im Falle der gesonderten Cerebellum-Auswertung, erschien daher angemessen. Zeigten Voxel bei diesem Kontrast eine signifikante Aktivierung, wurde den lokalen Aktivierungsmaxima anschließend eine neuronale Struktur zugewiesen. Dazu wurde ein probabilistisches, auf cytoarchitektonischen Daten beruhendes, Labeling mithilfe der Anatomy Toolbox (Version 1.7; Eickhoff et al., 2005) für SPM8 durchgeführt. Aktivierungen, die innerhalb des Cerebellums lagen, wurden den cerebellären Lobuli jedoch nicht auf Basis des Atlanten der Forschergruppe aus Jülich zugeordnet (Eickhoff et al., 2005), sondern unter Verwendung des probabilistischen Atlanten der SUIT-Toolbox (Diedrichsen et al., 2009).

Führte das probabilistische Labeling zu keinem Ergebnis, weil die Koordinaten der Aktivierung außerhalb der probabilistischen Atlanten lagen, erfolgte die Zuweisung einer Struktur anhand von makro-anatomischen Daten (Tzourio-Mazoyer et al., 2002).

Um den Einfluss des Expertiseniveaus auf die neuronale Aktivität während der Antizipation von Handlungseffekten zu untersuchen, wurde der Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung* gemäß Penny & Hanson (2007) als ANOVA mit dem Within-Subject Faktor Antizipation (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Reine Beobachtungsbedingung*) und dem Between-Subject Faktor Expertise (Tennisexperte, Novize) berechnet. Mit dem Ziel zu untersuchen, ob unterschiedliche Antizipationsaufgaben zu Aktivierungsunterschieden in Arealen des AON führen und ob es einen Interaktionseffekt zwischen den Antizipationsbedingungen und der Expertise der Probanden gibt, wurden die *Motorische* und die *Räumliche Antizipationsbedingung* sowohl für alle 32 Probanden zusammen, als auch im Rahmen einer ANOVA zwischen den Expertisegruppen verglichen. Zusätzlich wurde dieser Kontrast auch in den beiden Expertisegruppen getrennt betrachtet. Um zu prüfen, ob eine im Vergleich zu den Novizen stärkere Aktivierung in der Expertengruppe ausschließlich bei der Antizipation von Handlungseffekten der eigenen Sportart zu finden war, wurde die neuronale Aktivität während der *Nur Ball Antizipationsbedingung*, für die keiner der Probanden eine Expertise besaß, zwischen beiden Expertisegruppen kontrastiert.

Zusätzlich zu den beschriebenen Kontrasten wurden zwei Post-hoc-Analysen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter, die sich aus den Personen- und Verhaltensdaten der Studie ergaben, zu bestimmen. Zum einen sollte die Frage beantwortet werden, ob die Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation von Handlungseffekten durch die Antizipationsleistung der Probanden moduliert wird. Dazu wurde ein Parameter „Anzahl korrekter Antworten in den Tennisantizipationsbedingungen“ für den One-Sample-*t*-Test des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung* sowohl für alle 32 Probanden, als auch nur für die 16 Tennisexperten in das Second-Level-Modell eingefügt. Zum anderen sollte mit der Post-hoc-Analyse die Frage adressiert werden, ob das Trainingsalter der Tennisexperten einen Einfluss auf die Aktivierung während der Antizipation der Tennisschläge aufweist. In diesem Fall wurde der Parameter „Trainingsalter in Jahren“ für den One-Sample-*t*-Test des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung* für die 16 Tennisexperten eingeführt.

Aufgrund der Fragestellung, die wir mit der vorliegenden Studie untersuchen wollten, waren wir insbesondere an der Aktivierung in den Arealen des AON interessiert. Gemäß den formu-

lierten Hypothesen erwarteten wir Aktivierungsunterschiede in diesen Arealen in Abhängigkeit von der Instruktionsbedingung sowie des Expertiseniveaus. Daher wählten wir eine Region-of-Interest-Analyse (ROI-Analyse) mit apriori definierten Suchmasken als Auswertungsverfahren sowohl für den Between-Subject-Vergleich des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung*, als auch für alle Vergleiche der beiden Antwortbedingungen (*Motorische Antizipationsbedingung*, *Räumliche Antizipationsbedingung*) sowie für beide Kontraste, die den Einfluss eines Parameters (Anzahl korrekter Antworten, Trainingsalter) untersuchen sollten. Die Auswahl der Areale für diese ROI-Analyse war für alle gerechneten Kontraste identisch und beruhte auf den Ergebnissen der Metaanalyse von Caspers et al. (2010). Enthalten waren der IPL, der IPS, der SPL, der dPMC und vPMC, der SMA, der S1 und der IFG. Da die Metaanalyse von Caspers und Kollegen (2010) keine Informationen über das Cerebellum beinhaltete, wählten wir für die ROI-Analyse der cerebellären Daten die Areale aus, die in vorangegangenen Studien während der Beobachtung (beispielsweise Dimitrova et al., 2006; Schmahmann et al. 2009) und der Ausführung (beispielsweise Sokolov et al., 2010) von Bewegungen aktiviert waren. Dies umfasste die Lobuli I-IV, V, VI, VII, und VIII, sowie Crus I und Crus II. Erstellt wurden die Masken für die ROI-Analyse der cerebellären Daten auf Basis des, in der SUIT-Toolbox enthaltenen, probabilistischen Atlanten (Diedrichsen et al., 2009) unter Verwendung der Software FSL (Smith et al., 2004). Diese Software wurde ebenfalls genutzt, um die Masken der ROI-Analyse der Daten des Cortex Cerebri zu erstellen, in diesem Fall basierten die Masken jedoch auf den cytoarchitektonischen Daten von Eickhoff et al. (2005). Alle verwendeten Masken beinhalteten nur die Voxel, die mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 50 % zur jeweiligen Struktur gehörten. Das Signifikanzniveau der ROI-Analysen betrug $p < .05$ (FWE-korrigiert).

2.4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Studie Tennisexperten vs. -novizen vorgestellt werden. Zu Beginn werden daher die Verhaltensdaten präsentiert, gefolgt von den hirnphysiologischen Ergebnissen. Ausgewertet wurden jeweils die Daten von 32 der 33 Versuchsteilnehmer, da bei einer Versuchsteilnehmerin davon ausgegangen werden musste, dass diese die unterschiedlichen Instruktionsbedingungen nicht korrekt bearbeitet hatte.

2.4.1 Behaviorale Daten

In einem ersten Schritt wurde die Antizipationsleistung der beiden Gruppen für beide Tennis-Antizipationsbedingungen kombiniert betrachtet. Die Novizen gaben im Mittel bei 57.29 % ($SD = 7.07$) der Tennisschläge eine korrekte Antwort, die Tennisexperten hingegen bei 70.18 % ($SD = 10.08$). Wurde die Anzahl an korrekten Antworten für beide Tennis-Antizipationsbedingungen getrennt betrachtet, lagen die Tennisexperten in der *Motorischen Antizipationsbedingung* durchschnittlich bei 69.66 % ($SD = 9.44$) und in der *Räumlichen Antizipationsbedingung* bei 70.70 % ($SD = 11.29$). Im Vergleich dazu betrug die Anzahl korrekter Antworten der im Tennis unerfahrenen Probanden im Durchschnitt 57.13 % ($SD = 7.64$) in der *Motorischen Antizipationsbedingung* und 57.42 % ($SD = 8.12$) in der *Räumlichen Antizipationsbedingung* (siehe Abb. 5). In beiden Gruppen lag die Leistung sowohl in der *Motorischen* als auch in der *Räumlichen Antizipationsbedingung* signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 % ($t_{\text{Experten Motorisch}}(15) = 8.33$, $p < .001$, $d = 2.08$; $t_{\text{Experten Räumlich}}(15) = 7.33$, $p < .001$, $d = 1.83$; $t_{\text{Novizen Motorisch}}(15) = 3.75$, $p = .002$, $d = .94$; $t_{\text{Novizen Räumlich}}(15) = 3.66$, $p = .002$, $d = .91$). Um den Einfluss der Expertise und der Antwortbedingungen auf die Anzahl der korrekten Antworten zu untersuchen, wurde im Anschluss eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Expertiseniveau (Novize, Experte) und Antwortbedingung (*Motorische Antizipationsbedingung*, *Räumliche Antizipationsbedingung*) mit Messwiederholung auf dem Faktor Antwortbedingung gerechnet. Diese ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Expertiseniveau ($F(1,30) = 17.54$, $p < .001$, $\eta^2 = .369$), was auf die im Vergleich zu den Novizen bessere Antizipationsleistung der Tennisexperten zurückzuführen ist. Sowohl der Faktor Antwortbedingung ($F(1,30) < 1$, n.s.), als auch die Interaktion zwischen beiden Faktoren ($F(1,30) < 1$, n.s.) zeigten hingegen keinen signifikanten Effekt.

Die gleiche 2×2 faktorielle Varianzanalyse wurde auch für die Antwortzeiten der Tennis-Antizipationsbedingung durchgeführt. Definiert war die Antwortzeit in der vorliegenden Studie dabei als der Zeitraum zwischen dem Ball-Schläger-Kontakt und dem Tastendruck der Versuchsperson. Die durchschnittlichen Antwortzeiten der Tennisexperten betragen 691 ms ($SD = 380$) in der *Motorischen* und 674 ms ($SD = 366$) in der *Räumlichen Antizipationsbedingung*, die der Novizen 733 ($SD = 259$) respektive 675 ms ($SD = 221$) (siehe Abb. 6). Die gerechnete Varianzanalyse ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Antwortbedingung ($F(1,30) = 6.68$, $p = .015$, $\eta^2 = .182$), der durch schnellere Antworten in der *Räumlichen Antizipationsbedingung* in beiden Probandengruppen zu erklären ist. Der Faktor Expertise-

niveau ($F(1,30) < 1$, n.s.) sowie die Interaktion beider Faktoren ($F(1,30) = 1.84$, $p = .185$, $\eta^2 = .058$) ergaben keinen signifikanten Unterschied.

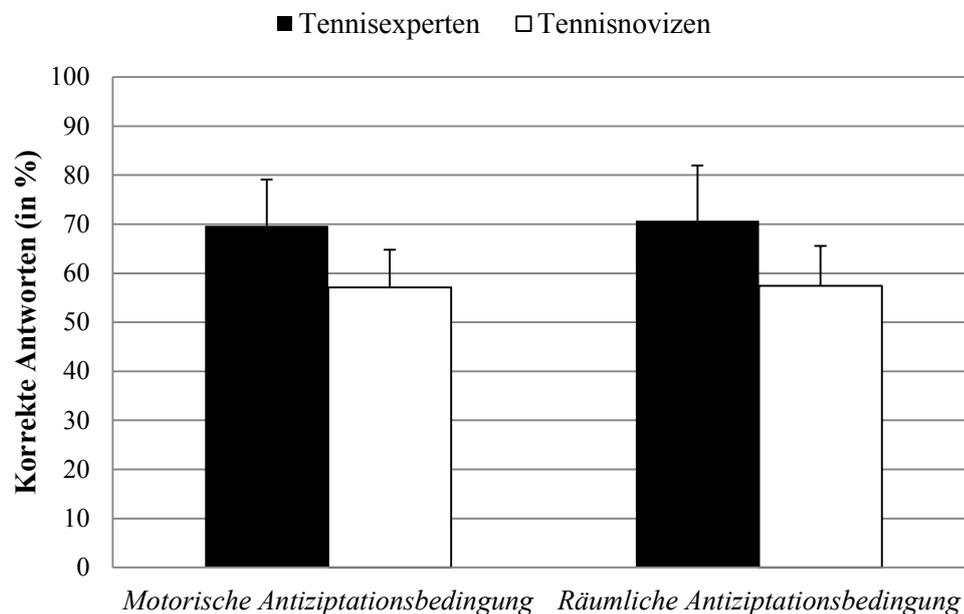


Abb. 5 Mittelwerte der korrekten Antworten in Prozent von allen 32 Probanden für die beiden Tennis Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertiseniveau (Tennisexperten, Tennisnovizen) sowie nach Antizipationsbedingung (*Motorische Antizipationsbedingung*, *Räumliche Antizipationsbedingung*).

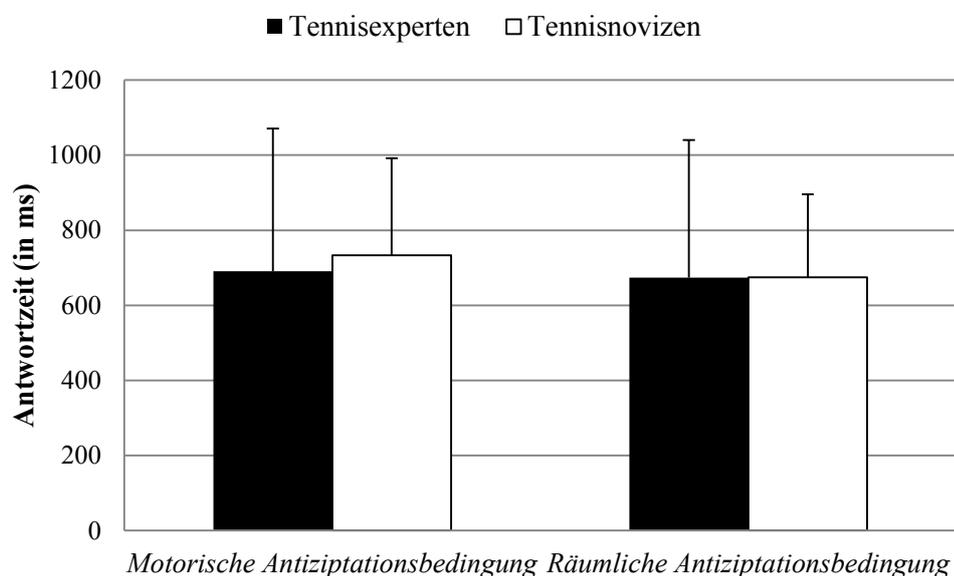


Abb. 6 Antwortzeiten in Millisekunden von allen 32 Probanden für die beiden Tennis Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertiseniveau (Tennisexperten, Tennisnovizen) sowie nach Antizipationsbedingung (*Motorische Antizipationsbedingung*, *Räumliche Antizipationsbedingung*).

Bei der Antizipation in der *Nur Ball Antizipationsbedingung* zeigten beide Probandengruppen eine vergleichbare Leistung. Die Novizen gaben im Durchschnitt bei 51.82 % ($SD = 25.55$) der 24 Trials eine korrekte Antwort, die Tennisexperten bei 53.39 % ($SD = 22.22$). Um zu überprüfen, ob sich die beiden Gruppen systematisch in Bezug auf ihre Leistung in der Nur Ball Antizipationsbedingung unterschieden, wurde ein t -Test für unabhängige Stichproben für diese Bedingung durchgeführt. Dieser ergab jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den Experten und den Novizen ($t(30) < 1$, n.s.). In der *Reinen Beobachtungsbedingung* hatten die Probanden die Aufgabe, die Spieler beim Ballprellen zu beobachten und anschließend die Taste zu drücken, die Ihnen in der zuvor dargebotenen Instruktion vorgegeben wurde. Da in dieser Bedingung alle 32 Probanden ausschließlich korrekte Antworten gaben, ist davon auszugehen, dass die Aufmerksamkeit auch in dieser Beobachtungsbedingung konstant hoch war.

2.4.2 Hirnphysiologische Daten

In der vorliegenden Studie soll mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie die Bedeutung motorik-assoziierter Gehirnareale für die Antizipation von Handlungseffekten untersucht werden. Von besonderem Interesse ist dabei der Unterschied zwischen verschiedenen Expertisegruppen sowie unterschiedlichen Antizipationsbedingungen. Daher nahmen an der Studie Tennisexperten und Tennisnovizen teil, die sowohl motorische als auch räumliche Antizipationsbedingungen absolvierten. In einem ersten Kontrast wurde die Antizipation der Tennisschläge jedoch unabhängig des Expertiseniveaus und der Antizipationsbedingungen mit der reinen Bewegungsbeobachtung verglichen. Dieser Kontrast wurde als Ganzkopfanalyse ausgeführt, die Ergebnisse beinhalten daher alle Aktivierungen, deren p -Werte FWE-korrigiert (Family-Wise-Error) unterhalb der Signifikanzschwelle von $p = .05$ liegen. Eine Zuordnung der signifikanten Aktivierungen zu einem bestimmten Areal erfolgte dabei entweder mithilfe des probabilistischen Labelings, wenn die Wahrscheinlichkeit dieser Zuordnung bei mindestens 20 % lag, oder anhand eines anatomischen Labelings. Beide Varianten sind in der Anatomy Toolbox (Eickhoff et al., 2005) für SPM8 implementiert. Bei allen weiteren Kontrasten wurden ROI-Analysen durchgeführt, für die die Signifikanzschwelle ebenfalls bei $p = .05$ (FWE-korrigiert) lag. Dies war unter anderem für den Vergleich der beiden Expertisegruppen der Fall, mit dem der Einfluss der eigenen Erfahrung auf die Aktivierung des AON bei der Antizipation der Tennisschläge untersucht werden sollte. Und auch bei den Verglei-

chen der beiden Antizipationsbedingungen wurde anhand von ROI-Analysen nach Aktivierungsunterschieden in den Arealen des AON gesucht.

Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation von Handlungseffekten

In einem ersten Schritt waren wir an den Gehirnarealen interessiert, die unabhängig von der Expertise bei allen 32 Versuchspersonen während der Antizipation von Handlungseffekten aktiviert waren. Bereits publizierte Studien (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013; Bishop et al. 2013) hatten eine Aktivierung von Arealen des AON während der Effektantizipation beschrieben. Mit dem Ziel diese Ergebnisse zu replizieren, wurde ein One-Sample-*t*-Test des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden gerechnet. Da die gezeigten Videos der *Reinen Beobachtungsbedingung* in Bezug auf die visuelle Stimulation mit den Vorhandschlägen vergleichbar waren (gleiche Spieler, Interaktion der Spieler mit Schläger und Tennisball, identische Halle und Bildausschnitt) und auch die Beobachtung der Tennisspieler beim Ballprellen eine Beobachtung menschlicher Bewegungen darstellte, waren Aktivierungsunterschiede bei diesem Kontrast nicht auf die reine Bewegungsbeobachtung oder Unterschiede in der visuellen Stimulation zurückzuführen, sondern insbesondere auf den Prozess der Antizipation. Der Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* bei allen 32 Versuchsteilnehmern führte zu signifikanter Aktivierung des dPMC, des SPL, des IFG, des S1 (BA 2), der Insula, des Thalamus, des superioren medialen Gyrus (SMG), des mittleren cingulären Kortex (MCC), des Hippocampus, des Nucleus Caudatus, der visuellen Kortex (V1, V2, V5), sowie Crus I, Crus II, Lobulus VI, Lobulus VIIIb und Lobulus IX des Cerebellums ($p < .05$, FWE-korrigiert) (siehe Abb. 7). Eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tab. 2 zu finden. Die Einteilung des PMC (BA 6) in einen dorsalen und einen ventralen Teil erfolgte auf Höhe $z = 50$, basierend auf der Empfehlung von Rizzolatti et al. (2002).

Um zu untersuchen, ob die Antizipationsleistung der Versuchsteilnehmer einen Einfluss auf die Aktivierung des AON während der Antizipation der Tennisvorhandschläge hatte, führten wir die Anzahl korrekter Antworten aller Versuchsteilnehmer als einen zusätzlichen Parameter ein. Der Einfluss dieses Parameters „Antizipationsleistung Tennis“, mit Werten zwischen 49 % und 88 % ($M = 63.74$ %, $SD = 10.78$), wurde für den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden ermittelt. Die entsprechende post-hoc ROI-Analyse zeigte, dass eine bessere Antizipationsleistung mit einem Anstieg der Aktivität des SPL sowie Crus II, Lobulus I-IV, Lobulus VIIIb, Lobulus VIIIA und Lobulus

VIIIb des Cerebellums einherging. Diese leistungsabhängige Aktivitätssteigerung zeigte sich nicht in Arealen außerhalb des AON (mittlerer frontaler Gyrus, frontales Operculum und frontaler Pol), die zur Kontrolle ebenfalls in diese Auswertung miteinbezogen wurden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tab. 3 zu finden.

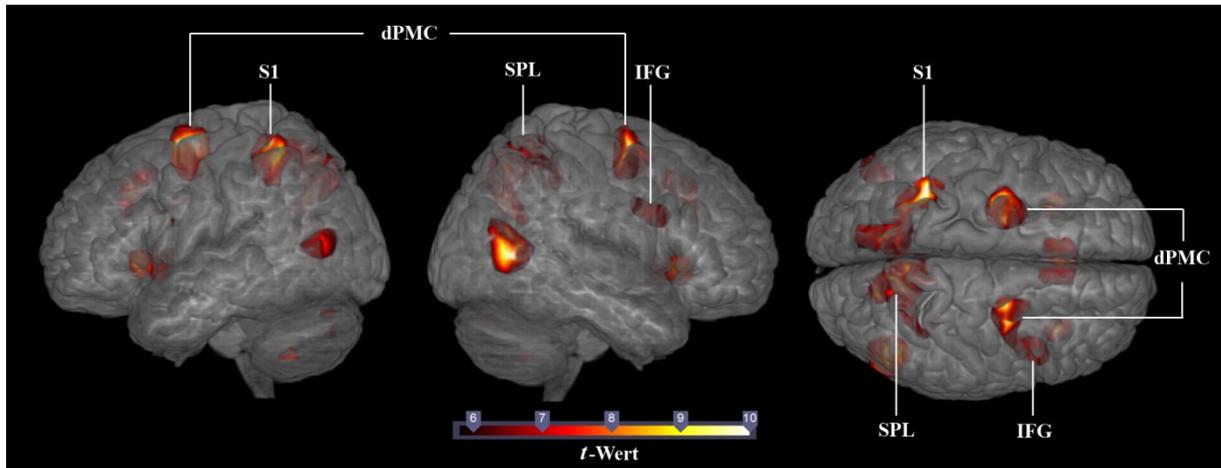


Abb. 7 Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5.8 und 10) (Balser et al., 2014; Beschriftung geändert).

Tab. 2 Ergebnisse der Ganzkopfanalyse des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung* > *Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden.

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t -Wert	SUIT
dPMC	L	-27	-7	58	16.47	
dPMC	R	27	-4	58	11.12	
S1 (BA 2)	L	-33	-46	55	11.16	
IFG (pars triangularis)*	R	45	14	25	8.49	
IFG (pars opercularis)	L	-48	5	22	6.45	
IFG (pars opercularis)*	L	-51	2	34	6.13	
SPL (7A)*	R	18	-67	43	10.39	
SPL (5M)	R	12	-52	58	10.35	
Cerebellum, Lobulus IX	L	-12	-54	-49	8.40	✓
Cerebellum, Lobulus IX	R	14	-54	-51	7.38	✓
Cerebellum, Crus II	L	-8	-80	-37	7.71	✓
Cerebellum, Crus II	R	6	-76	-35	5.98	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-10	-76	-25	7.43	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-36	-36	-33	6.26	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-24	-60	-29	5.10	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	R	28	-42	-45	5.75	✓

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
Cerebellum, Crus I	R	38	-44	-37	5.19	✓
Cerebellum, Crus I	R	38	-64	-29	5.01	✓
V1	L	-9	-100	10	6.00	
V2	L	-15	-97	10	6.33	
V5	R	48	-61	7	11.67	
V5	L	-45	-73	10	7.86	
Insula**	L	-30	20	1	10.58	
Insula**	R	33	23	-2	9.80	
SMG**	L	-9	20	40	9.08	
MCC**	L	-6	26	34	8.96	
MCC**	R	9	17	43	7.69	
Nucleus Caudatus **	L	-9	14	1	7.76	
Nucleus Caudatus **	R	12	14	-2	6.27	
Nucleus Caudatus **	R	9	5	1	6.11	
Thalamus**	L	-12	-25	10	6.42	
Thalamus**	R	6	-13	10	6.09	
Hippocampus*	R	9	-31	-5	6.28	
Hippocampus*	R	15	-31	4	6.21	

* Probabilistisches Labeling unter 20 %. ** Anatomisches Labeling. MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert. Für Abkürzungen, siehe Text.

Tab. 3 Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung Tennis“ auf den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* für alle 32 Probanden (ROI-Analyse).

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
SPL (7PC)	R	21	-73	64	3.27	
SPL (5Ci)	L	-15	-34	46	2.76	
Cerebellum, Crus II	L	-24	-88	-39	3.58	✓
Cerebellum, Lobulus I-IV	R	18	-40	-23	3.51	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	L	-22	-42	-51	3.43	✓
Cerebellum, Lobulus VIIa	L	-4	-68	-35	2.82	✓
Cerebellum, Lobulus VIIb	L	-4	-68	-33	2.76	✓

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

Expertiseabhängige Unterschiede der AON-Aktivierung während der Effektantizipation

Mit dem Ziel die Areale des AON zu identifizieren, deren Aktivierungsstärke während der Antizipation von Handlungseffekten von der Expertise der Probanden abhängig war, wurde der Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* auch als Between-Subject-Vergleich zwischen den Tennisexperten und den Novizen gerechnet. Dabei wurde zunächst in jeder Gruppe die reine Bewegungsbeobachtung von der Antizipation der Tennisschläge abgezogen, um Aktivierungsunterschiede zwischen den Expertisegruppen basierend auf der reinen Bewegungsbeobachtung, auszuschließen. Im Vergleich zu den Novizen führte die Effektantizipation bei den Tennisexperten zu einer signifikant stärkeren Aktivierung des IFG, des IPS und des SPL sowie zu einer signifikant höheren Aktivierung des Cerebellums in Lobulus VIIIb und einem großen Cluster, dass sich über Crus I, Crus II, Lobulus VI, Lobulus VIIb und Lobulus VIIIa erstreckte. Eine stärkere Aktivierung für die Novizen konnte im Vergleich mit den Tennisexperten hingegen in keinem Areal gefunden werden. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tab. 4 und Abb. 8 zu finden.

Tab. 4 Ergebnisse des Between-Subject-Vergleichs der Tennisexperten und der Tennisnovizen für den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* (ROI-Analyse).

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
Tennisexperten > Tennisnovizen						
IFG (pars opercularis)	L	-45	5	25	3.84	
SPL (7P)	L	-30	-52	64	3.19	
IPS	L	-36	-46	43	2.62	
Cerebellum, Crus I	L	-6	-74	-31	4.38	✓
Cerebellum, Crus II	L	-2	-78	-35	5.15	✓
Cerebellum, Crus II	R	10	-80	-29	4.27	✓
Cerebellum, Lobulus VIIb	L	-4	-74	-39	3.91	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIa	R	4	-72	-43	3.91	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	L	-20	-40	-49	3.51	✓
Tennisnovizen > Tennisexperten						
-	-	-	-	-	-	

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

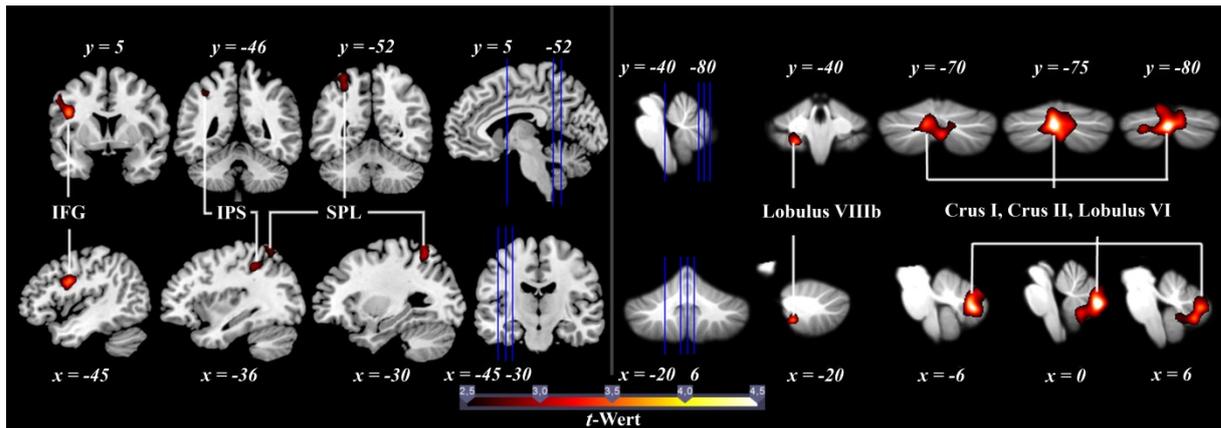


Abb. 8 Darstellung der signifikanten Aktivierung des Between-Subject-Vergleichs der Tennisexperten und der Tennisnovizen für den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 2.5 und 4.5) (Balsler et al., 2014; Beschriftung geändert).

Um den Einfluss der Expertise weitergehend zu untersuchen, wurde auch innerhalb der Expertengruppe ein Parameter „Antizipationsleistung Tennis“ mit Werten zwischen 51 % und 88 % ($M = 70.18\%$, $SD = 10.08$) für den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* eingeführt. Gemäß der durchgeführten post-hoc ROI-Analyse zeigte sich eine signifikant stärkere Aktivierung des SPL für diejenigen Experten, die die Tennisschläge besonders gut antizipierten. In einer weiteren Auswertung wurde das Trainingsalter der Experten in die Auswertung des Kontrasts *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* miteinbezogen. Mithilfe des Parameters „Trainingsalter in Jahren“ sollte überprüft werden, ob sich die Aktivierung des AON während der Effektantizipation zwischen besonders erfahrenen und verhältnismäßig weniger erfahrenen Experten unterscheidet. Das Trainingsalter der Tennisexperten variierte dabei zwischen 7 und 29 Jahren ($M = 16.00$ Jahre, $SD = 5.73$). Die entsprechende post-hoc ROI-Analyse ergab innerhalb der Tennisexperten eine signifikant stärkere Aktivierung von Lobulus VIIIb des Cerebellums während der Antizipation der Tennisschläge für die erfahreneren Spieler (für detailliertere Ergebnisse siehe Tab. 5).

In einem zusätzlichen Vergleich der beiden Expertisegruppen sollte untersucht werden, ob die stärkere AON-Aktivierung der Experten spezifisch bei der Antizipation von Tennisschlägen auftrat, oder auch bei einer Antizipationsaufgabe, für die die Tennisexperten keine Expertise vorweisen konnten. Dazu wurde die Aktivierung der *Nur Ball Antizipationsbedingung* zwischen beiden Gruppen verglichen. Dieser Vergleich ergab keine signifikanten Aktivitätsunterschiede zwischen den Tennisexperten und den Novizen.

Tab. 5 Der Einfluss der Parameter „Antizipationsleistung Tennis“ und „Trainingsalter“ auf den Kontrast *Tennis Antizipationsbedingung > Reine Beobachtungsbedingung* innerhalb der Tennisexperten (ROI-Analyse).

Name des Areal	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
„Antizipationsleistung Tennis“						
SPL (5Ci)	L	-15	-34	46	3.95	
„Trainingsalter“						
Cerebellum, Lobulus VIIIb	L	-20	-44	-51	3.98	✓

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

Unterschiede zwischen der motorischen und der räumlichen Antizipationsbedingung

Durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Antizipationsbedingungen sollte untersucht werden, ob diese verschiedenen Instruktionsbedingungen die Aktivierung des AON während der Antizipation von Handlungseffekten modulieren. Hierzu wurden die *Motorische Antizipationsbedingung* mit der *Räumlichen Antizipationsbedingung* und die *Räumliche Antizipationsbedingung* mit der *Motorischen Antizipationsbedingung* kontrastiert. Der Vergleich beider Bedingungen für alle 32 Probanden unabhängig von der Expertise resultierte in einer stärkeren Aktivierung des S1, des IFG, des IPL und des medialen SPL, wenn die *Motorische* mit der *Räumlichen* Antizipationsbedingung kontrastiert wurde. Der umgekehrte Kontrast, *Räumliche Antizipationsbedingung > Motorische Antizipationsbedingung*, führte zu einer stärkeren Aktivierung in weiter lateral und anterior gelegenen Bereichen des SPL. Für die Tennisexperten getrennt betrachtet ergab der Kontrast *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* eine stärkere Aktivierung des IPL, wohingegen der SPL eine höhere Aktivierung im entgegengesetzten Kontrast zeigte. Bei den Novizen resultierte die *Motorische Antizipationsbedingung* in einer stärkeren Aktivierung des vPMC, des S1 (Area 1), des prä-SMA und des SPL. Der umgekehrte Kontrast *Räumliche Antizipationsbedingung > Motorische Antizipationsbedingung* führte bei den Novizen hingegen zu keinen signifikanten Unterschieden. Um zu untersuchen, ob die instruktionsabhängige Modulation durch die Expertise der Probanden beeinflusst wurde, wurde der Kontrast zwischen den beiden Antizipationsbedingungen auch in einem Between-Subject-Vergleich zwischen den beiden Expertisegruppen durchgeführt. Dabei zeigten die Novizen für den Kontrast *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* im Vergleich zu den Tennisexperten eine signifikant stärkere Aktivierung des vPMC, des SMA proper und des SPL.

Alle Ergebnisse zum Vergleich der *Motorischen* und *Räumlichen Antizipationsbedingung* sind in Tab. 6 und Abb. 9 zusammengefasst.

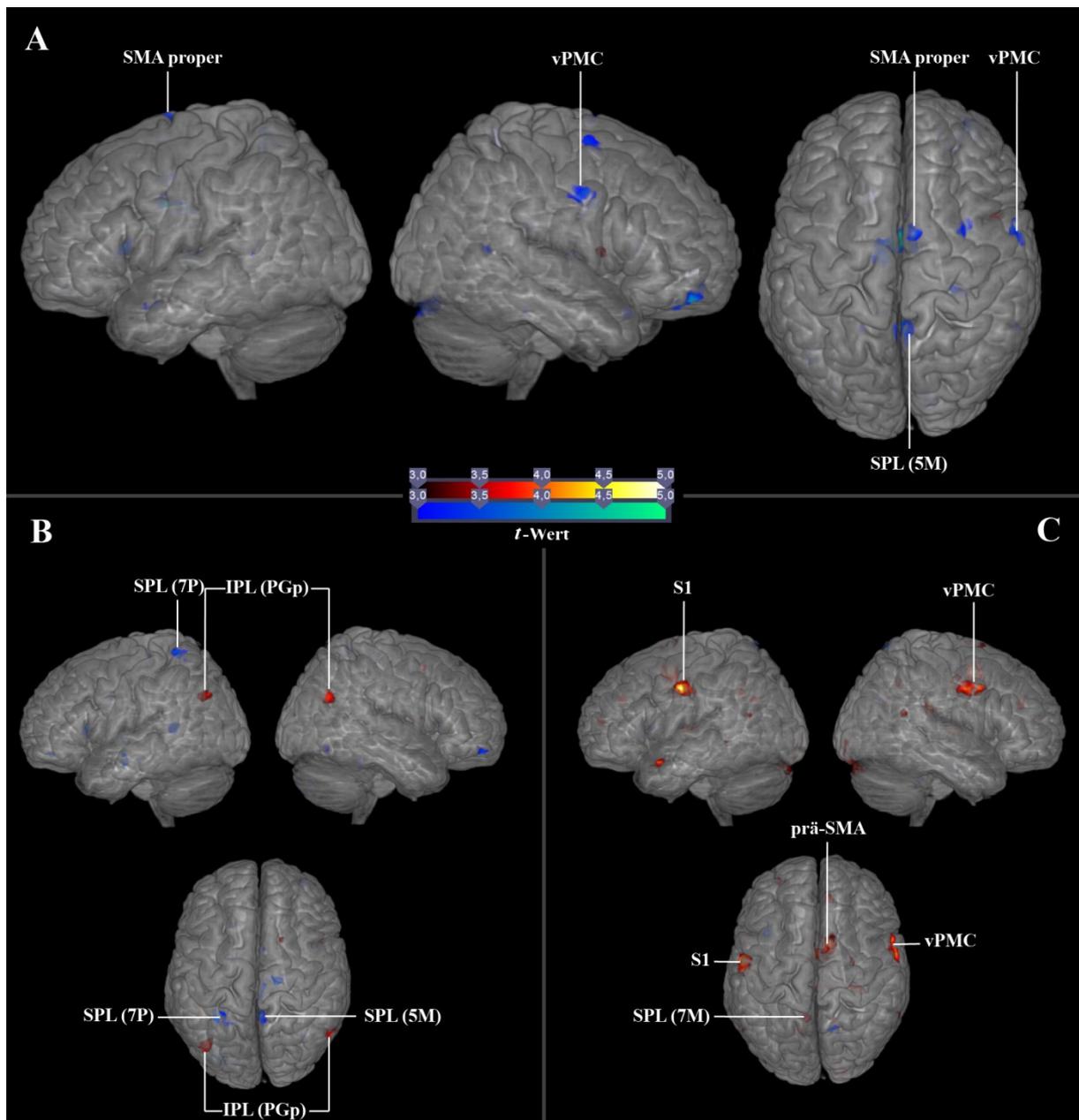


Abb. 9 (A) Darstellung der signifikanten Aktivierung der Tennisnovizen im Between-Subject-Vergleich mit den Tennisexperten für den Kontrast *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* (blau). (B) Darstellung der signifikanten Aktivierung innerhalb der 16 Tennisexperten für den Kontrast *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* (rot) sowie den umgekehrten Kontrast *Räumliche Antizipationsbedingung > Motorische Antizipationsbedingung* (blau). (C) Darstellung der signifikanten Aktivierung innerhalb der 16 Tennisnovizen für den Kontrast *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* (rot). (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 3 und 5) (Balsler et al., 2014; Beschriftung geändert).

Tab. 6 Ergebnisse der ROI-Analyse des Kontrasts *Motorische Antizipationsbedingung > Räumliche Antizipationsbedingung* sowohl für alle 32 Probanden als auch im Between-Subject-Vergleich sowie innerhalb der Gruppen.

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
<i>Motorisch > Räumlich</i> (alle 32 Probanden)						
IFG (BA44)	L	-57	11	31	4.03	
S1 (BA 1)	L	-57	-13	40	3.98	
IPL (PGp)	L	-42	-76	34	3.76	
IPL (PGp)	R	57	-64	28	5.05	
IPL (PGa)	R	63	-55	22	4.22	
SPL (7M)	L	-3	-70	37	2.98	
SPL (7M)	R	0	-73	43	3.43	
<i>Räumlich > Motorisch</i> (alle 32 Probanden)						
SPL (7A)	L	-21	-61	70	3.83	
SPL (7A)	R	9	-64	70	3.73	
SPL (7P)	L	-33	-52	67	3.02	
<i>Motorisch > Räumlich</i> (Tennisexperten > Tennismovizen)						
-	-	-	-	-	-	
<i>Motorisch > Räumlich</i> (Tennismovizen > Tennisexperten)						
vPMC	R	57	2	40	3.99	
SMA proper	R	6	-1	73	3.80	
SPL (5M)	R	3	-52	64	3.83	
<i>Motorisch > Räumlich</i> (nur Tennisexperten)						
IPL (PGp)	L	-39	-73	37	4.34	
IPL (PGp)	R	57	-64	28	4.30	
<i>Räumlich > Motorisch</i> (nur Tennisexperten)						
SPL (5M)	R	3	-49	64	3.79	
SPL (7P)	L	-33	-52	67	4.22	
<i>Motorisch > Räumlich</i> (nur Tennismovizen)						
vPMC	R	57	5	40	5.04	
S1 (BA 1)	L	-57	-7	40	5.62	
prä-SMA	R	9	2	52	7.16	
SPL (7M)	L	-3	-70	37	2.73	
<i>Räumlich > Motorisch</i> (nur Tennismovizen)						
-	-	-	-	-	-	

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

2.5 Diskussion

Das Ziel von Experiment 1 war es zu untersuchen, welchen Beitrag das AON und vor allem die eigenen motorischen Repräsentationen bei der Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen leisten. Daher wurde die funktionelle Magnetresonanztomographie eingesetzt, um den Einfluss der eigenen motorischen Repräsentationen auf die Effektantizipation zu untersuchen. Der Vergleich zwischen den Experten und den Novizen hatte außerdem das Ziel, die expertisebedingten Unterschiede während der Vorhersage von Handlungseffekten zu beleuchten und so weitere Erkenntnisse über die neuronalen Prozesse, die mit der besseren Antizipationsleistung von Experten assoziiert sind, zu gewinnen. Darüber hinaus sollten die Auswirkungen von unterschiedlichen Antwortbedingungen auf die Aktivierung des AON untersucht werden.

Auf Verhaltensebene resultierte der Vergleich zwischen den Tennisexperten und den Novizen in einer signifikant besseren Antizipationsleistung der erfahrenen Tennisspieler. Unabhängig von der Expertise der Probanden führte die Antizipation der Schlagrichtung im Vergleich zur Beobachtung des Ballprellens zu einer signifikant stärkeren Aktivierung des SPL, des S1, des IFG, des dPMC sowie des Cerebellums. Die Stärke der Aktivierung war dabei mit der Antizipationsleistung korreliert. So zeigte sich bei einer höheren Anzahl korrekter Antworten eine stärkere Aktivierung des SPL sowie des Cerebellums. Im Vergleich zu den Novizen resultierte die Antizipation der Richtung der Vorhandschläge bei den Tennisexperten in einer stärkeren Aktivierung des IFG, des IPS, des SPL und des Cerebellums. Innerhalb der Tennisexperten zeigte sich außerdem ein linearer Zusammenhang zwischen dem Trainingsalter und der Aktivierung von Lobulus VIIIb des Cerebellums sowie der Antizipationsleistung und der Aktivierung des SPL. Der Vergleich der unterschiedlichen Instruktionsbedingungen ergab während der Vorhersage der eigenen Reaktion (*Motorische Antizipationsbedingung*) eine stärkere Aktivierung des IPL und des SPL sowie des IFG. Für die Vorhersage der Flugrichtung des Balles ergab sich hingegen eine stärkere Aktivierung in einem weiter anterior und lateral gelegenen Bereich des SPL. Die Untersuchung der Interaktion zwischen den Instruktionsbedingungen und der Expertise der Probanden konnte zeigen, dass die Verarbeitung der beiden unterschiedlichen Instruktionen vom Expertiseniveau abhängig ist. So resultierte die Vorhersage der eigenen Reaktionen in der Novizengruppe im Vergleich zu den Tennisexperten in einer signifikant stärkeren Aktivierung des vPMC, des SMA proper und des SPL. Diese Ergebnisse sollen in den nun folgenden Abschnitten diskutiert werden.

2.5.1 Die Antizipationsleistung der beiden Experimentalgruppen

Die Leistung bei der Vorhersage der Tennisschläge lag in beiden Probandengruppen signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 Prozent. Demnach waren sowohl die Tennisexperten als auch die Novizen in der Lage die Schlagrichtung anhand der verfügbaren Informationen zu antizipieren. Da alle Schläge zum Zeitpunkt des Ball-Schläger-Kontakts gestoppt wurden und somit keine Informationen über den Ballflug verfügbar waren, konnten die Probanden lediglich die kinematischen Informationen der beobachteten Bewegungen nutzen. Auf Basis der Ergebnisse der zahlreichen Expertiseuntersuchungen der letzten vier Jahrzehnte wurde erwartet, dass die Experten im Vergleich zu den unerfahrenen Probanden eine signifikant bessere Antizipationsleistung zeigen (Williams et al., 2011). Die Ergebnisse von Experiment 1 konnten diese Erwartung bestätigen und entsprechen darüber hinaus den Resultaten der Studien von Cañal-Bruland et al. (2011b) sowie Williams et al. (2009), in denen Probanden ebenfalls die Richtung von Vorhandschlägen im Tennis antizipieren mussten. Experiment 1 liefert damit einen weiteren Nachweis dafür, dass die Antizipation anhand von kinematischen Informationen in Sportarten, in denen die Athleten unter hohem Zeitdruck Entscheidungen treffen müssen, einen wichtigen Aspekt der Expertise darstellt (für einen Überblick siehe Williams et al., 2011). Dabei ist zu beachten, dass die Versuchsbedingungen in der vorliegenden Studie im Vergleich zu den Expertiseuntersuchungen auf Verhaltensebene eine erhöhte Schwierigkeit aufwiesen. Denn die Probanden sahen die Stimuli nicht auf einem großen Bildschirm oder sogar als Projektion in Lebensgröße (siehe beispielsweise Williams et al., 2002), sondern als Projektion auf eine vergleichsweise kleine Leinwand, die sie über einen Spiegel an der Kopfspule des Kernspintomographen einsehen konnten (siehe Kap. 2.3.2 für weitere Informationen zur Präsentation der Videostimuli). Darüber hinaus entsprach die liegende Position der Probanden während der Versuchsdurchführung nicht der gewohnten aufrechten Position der Experten während der Beobachtung von Tennisbewegungen, was ebenfalls zu einer erhöhten Aufgabenschwierigkeit geführt haben könnte. Dass die Antizipationsleistungen mit vergleichbaren Studien auf Verhaltensebene (Cañal-Bruland et al., 2011b; Williams et al., 2002; Williams et al., 2009) übereinstimmen, deutet jedoch darauf hin, dass die Experten auch unter diesen Bedingungen von ihrer Expertise profitierten. Betrachtet man lediglich die Anzahl der korrekten Antworten in beiden Gruppen besteht eine weitere Erklärung des Leistungsunterschieds in unterschiedlich langen Antwortzeiten. So könnte der Grund für die schlechtere Leistung der Novizen auch in ihrem Versuch, besonders schnelle Antworten zu geben, liegen. Die Probanden wurden jedoch zu Beginn der Studie instruiert ihren

Fokus auf korrekte und nicht auf schnelle Antworten zu legen. Vor allem aber ergab der Vergleich der Antwortzeiten keine Unterschiede zwischen beiden Probandengruppen. Die Differenz in der Antizipationsleistung ist demnach auf die besseren Antizipationsfähigkeiten der Tennisexperten zurückzuführen. Welche neuronalen Aktivierungsunterschiede mit dieser Differenz in der Antizipationsleistung assoziiert sind wird in Kapitel 2.5.3 diskutiert.

2.5.2 Expertiseunabhängige Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten

Diverse Autoren konnten zeigen, dass die Antizipation von Handlungseffekten zu einer Aktivierung von Arealen des AON, vor allem in parietalen und prämotorischen Strukturen, führt. Dies gilt sowohl für Alltagstätigkeiten (Avenanti et al., 2013; Stadler et al., 2012; Urgesi et al., 2010) als auch insbesondere für die Vorhersage von Handlungseffekten im Sport (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011). Es wurde daher erwartet, dass die Antizipation der Vorhandschläge unabhängig vom Expertiseniveau des Beobachters in einer signifikant stärkeren Aktivierung des AON resultiert, wenn diese mit der reinen Beobachtungsbedingung kontrastiert wird. Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass die verwendete Kontrollbedingung so gewählt wurde, dass diese, abgesehen von der fehlenden Antizipationsaufgabe, in möglichst vielen Aspekten mit den Antizipationsbedingungen übereinstimmt. So mussten die Probanden in der Kontrollbedingung ebenfalls Bewegungen der zwei Modelle beobachten und im Anschluss eine der beiden Antworttasten drücken. Da Aspekte der visuellen Stimulation, wie zum Beispiel der Bildausschnitt und der Hintergrund, identisch waren und die Modelle auch in der Kontrollbedingung mit Schläger und Ball interagierten, ist davon auszugehen, dass der Vergleich zwischen der Antizipation der Tennisschläge und der Beobachtung des Ballprellens die neuronalen Prozesse der Effektantizipation isoliert. Bei den Ergebnissen dieses Kontrasts handelt es sich daher nicht um neuronale Aktivität, die durch die reine Bewegungsbeobachtung, die abgebildeten Modelle sowie das Drücken der Antworttasten hervorgerufen wird, sondern um Aktivität, die mit der Antizipation von Handlungseffekten assoziiert ist.

Dieser Antizipationsprozess führte unabhängig vom Expertiseniveau der Probanden, wie erwartet, zu einer signifikant stärkeren Aktivierung des SPL, des S1, des dPMC, des IFG sowie des Cerebellums und somit von diversen Arealen des AON (Caspers et al., 2010). Mit Experiment 1 konnten demnach die Ergebnisse von Wright et al. (2007) und Abreu et al. (2012) repliziert werden, die ebenfalls eine Aktivierung dieser Areale bei der Vorhersage von

Handlungseffekten im Sport gezeigt hatten. Die stärkere Aktivierung des dPMC passt insbesondere auch zu den Ergebnissen von Stadler und Kollegen, die in ihren Studien von 2011 und 2012 bereits die große Bedeutung des dPMC für die Effektvorhersage betont hatten. Dass es bei der Antizipation von Handlungseffekten im Vergleich zur Beobachtung von Bewegungen zu einer stärkeren Aktivierung von Arealen des AON und dabei vor allem auch von motorik-assoziierten Arealen wie dem dPMC kommt, ist ein weiterer Hinweis darauf, dass während dieser Vorhersage eine Simulation der beobachteten Bewegung in Arealen des AON stattfindet (Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Avenanti et al., 2013; Blakemore & Decety, 2001; Blakemore & Frith, 2005; Calvo-Merino et al., 2006; Caspers et al., 2010; Cross et al., 2009; Gazzola & Keysers, 2009; Iacoboni et al., 2005; Kilner et al., 2004; Miall, 2003; Oztop et al., 2005; Prinz, 2006; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Shmuelof & Zohary, 2007; Stadler et al., 2011; Wolfensteller, 2009; Zentgraf et al., 2009). So geht beispielsweise Prinz (2006) davon aus, dass die eigenen motorischen Repräsentationen zur internen Simulation der beobachteten Bewegung genutzt werden, um den Effekt der Handlung durch die Verwendung des Vorwärtsmodells antizipieren zu können (für einen Überblick siehe Miall, 2003).

Weitere Unterstützung für die Theorie einer Verwendung des AON zur Effekttantizipation kommt von der Post-hoc-Analyse des Vergleichs der Antizipation der Schlagrichtung mit der Beobachtungsbedingung in Abhängigkeit von der Antizipationsleistung der Probanden. So korrelierte die bessere Leistung bei der Antizipation der Vorhandschläge mit einer stärkeren Aktivierung des SPL sowie von Crus II, Lobulus I-IV, Lobulus VIIb, Lobulus VIIIa und Lobulus VIIIb des Cerebellums. Gleichzeitig ging eine höhere Anzahl an korrekten Antworten jedoch nicht mit einer stärkeren Aktivierung in Arealen außerhalb des AON (mittlere frontaler Gyrus, frontales Operculum, frontaler Pol) einher. Die höhere Aktivierung in Abhängigkeit von der Antizipationsleistung zeigte sich spezifisch in parietalen und cerebellären Strukturen des AON, was die Bedeutung dieser Areale für die Antizipation von Handlungseffekten unterstreicht.

2.5.3 Expertiseabhängige Aktivierung des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten

Sowohl Studien zur reinen Beobachtung von Bewegungen (Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Cross et al., 2009; Pilgramm et al., 2010) als auch Studien zur Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen (Aglioti et al., 2008; Bischoff et al., 2012; Wright et al., 2010,

2011) fanden Hinweise darauf, dass die Aktivierung von Arealen des AON von der Erfahrung des Beobachters abhängig ist (Turella et al., 2013). Beispielsweise konnten Cross und Kollegen (2009) in einer Studie, in der Probanden sowohl bereits trainierte als auch ungeübte Tanzsequenzen beobachteten, zeigen, dass die Beobachtung der bereits beherrschten Tanzschritte im Vergleich zu den unbekannt Sequenzen zu einer stärkeren Aktivierung des IFG, des PMC und des IPL führte. Weiterhin verglichen Wright et al. (2011) die Gehirnaktivierung von Experten und Novizen während der Vorhersage der Schlagrichtung von Badmintonschlägen. Im Kontrast mit den unerfahrenen Novizen zeigten die Badmintonexperten dabei ebenfalls eine signifikant stärkere Aktivierung des IPL, des IFG und des PMC sowie des SPL. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde erwartet, dass der Vergleich zwischen den Tennisexperten und den Novizen für den Kontrast der Antizipation der Tennisschläge mit der Beobachtungsbedingung in einer stärkeren Aktivierung des AON der Experten resultiert.

Die Tennisexperten zeigten im Vergleich zu den unerfahrenen Probanden bei der Vorhersage der Schlagrichtung eine stärkere Aktivierung des IFG, des IPS und des SPL. Zusätzlich ergab der Vergleich zwischen beiden Gruppen eine stärkere Aktivierung in diversen Arealen des Cerebellums. Die Ergebnisse von Experiment 1 liefern damit einen weiteren Hinweis darauf, dass Probanden mit ausgeprägten motorischen Repräsentationen im Vergleich zu unerfahrenen Probanden während der Effekttantizipation eine stärkere Aktivierung in Arealen des AON aufweisen (Aglioti et al., 2008; Bischoff et al., 2012; Wright et al., 2010, 2011). Der entgegengesetzte Vergleich zur Identifikation von Arealen, die bei den Novizen eine höhere Aktivität aufweisen als bei den Experten, brachte hingegen keine Ergebnisse. Um zu prüfen, ob die stärkere Aktivierung in der Expertengruppe bei der Antizipation von Handlungseffekten spezifisch bei der eigenen Sportart zu finden war, wurde die neuronale Aktivität während der *Nur Ball Antizipationsbedingung*, für die keiner der Probanden eine Expertise besaß, zwischen beiden Gruppen kontrastiert. Da dieser Vergleich zwischen beiden Probandengruppen zu keinen signifikanten Aktivierungsunterschieden führte, ist anzunehmen, dass die Tennisexperten ihre eigenen motorischen Repräsentationen insbesondere bei der Vorhersage innerhalb ihrer Expertisesportart nutzen. Bei der Interpretation der Ergebnisse der *Nur Ball Antizipationsbedingung* sind jedoch die Limitationen dieser Bedingung zu beachten (siehe Kap. 2.5.5).

Das Ergebnis mit dem größten Neuigkeitswert in Bezug auf den Experten-Novizen-Vergleich ist die stärkere Aktivierung von Crus I und II sowie Lobulus VI, VII und VIII des Cere-

bellums während der Effekttantizipation der Tennisexperten. Die Beteiligung des Cerebellums an der Vorhersage von Handlungseffekten und vor allem der Einfluss von Expertise auf die Aktivierung von cerebellären Strukturen konnte in vorangegangenen Studien zwar vereinzelt gezeigt werden (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Calvo-Merino et al., 2006; Cross et al., 2009), jedoch ließen methodische Defizite häufig keine detaillierte Interpretation der Ergebnisse zu. So wurde in den Studien, die eine Beteiligung des Cerebellums an der Effekttantizipation zeigen konnten, auf eine spezielle Normalisierung des Cerebellums verzichtet, so dass eine exakte Lokalisierung der Aktivierungsmaxima nicht möglich ist (für genauere Informationen siehe Diedrichsen (2006) sowie Kap. 2.3.6). Durch die gesonderte Normalisierung der cerebellären Strukturen mithilfe der SUIT-Toolbox für SPM8 sowie die Verwendung des in der Toolbox enthaltenen probabilistischen Atlanten des Cerebellums ist in der vorliegenden Studie eine exaktere Zuordnung der cerebellären Aktivierung zu den einzelnen Strukturen möglich.

Es wurde gezeigt, dass Crus I und Crus II sowie Lobulus VI, VII und VIII eine wichtige Rolle bei der Kontrolle der Bewegungsausführung spielen (Dimitrova et al., 2006; Donchin et al., 2012; Grodd et al., 2001; O'Reilly et al., 2010; Ramnani, 2006; Schmahmann et al., 2009; Stoodley & Schmahmann, 2009; Thickbroom et al., 2003). Dies betrifft insbesondere Arm- und Handbewegungen, wie Studien von Dimitrova et al. (2006), Donchin et al. (2012), Grodd et al. (2001) sowie Thickbroom et al. (2003) zeigen konnten. Der motorischen Kontrolle liegt dabei nach Ansicht vieler Autoren die Theorie der internen Modelle zugrunde (für einen Überblick siehe Wolpert et al., 1998b). Diese beinhalten ein inverses Modell sowie ein Vorwärtsmodell. Das inverse Modell wird bei der Bewegungsausführung zur Ermittlung der motorischen Befehle genutzt, die benötigt werden um einen gewünschten Effekt zu erzielen (Miall, 2003; Wolpert et al., 1998b). Im Anschluss wird das Vorwärtsmodell verwendet, um anhand des aktuellen Status des motorischen Systems sowie des geplanten motorischen Befehls den sensorischen Effekt der Bewegung vorherzusagen (Miall & Wolpert, 1996; Miall, 2003; Wolpert et al., 1998b). Das Cerebellum spielt in den Augen vieler Autoren eine entscheidende Rolle für die internen Modelle (Blakemore & Sirigu, 2003; Ito, 2008; Kawato et al., 2003; Miall & King, 2008; Miall et al., 1993; Wolpert et al., 1998b). Und das nicht nur für die Vorhersage der Effekte der eigenen Bewegungsausführung, sondern auch für die Vorhersage von Effekten beobachteter Bewegungen (Blakemore & Decety, 2001; Cerminara et al., 2009; Gazzola & Keysers, 2009; Miall 2003; Oztop et al., 2005; Prinz, 2006; Schippers & Keysers, 2011; Shmuelof & Zohary, 2007; Wolpert et al., 2003; Wolpert & Flanagan, 2001;

Yarrow et al., 2009). Bei der Beobachtung wird zunächst das inverse Modell genutzt, um den motorischen Befehl zu identifizieren, der zur Ausführung der beobachteten Bewegung nötig ist und im Anschluss auf Basis dieses Befehls mithilfe des Vorwärtsmodells der Effekt der Handlung vorhergesagt (Gazzola & Keysers, 2009). Dass es in Experiment 1 bei den Tennisexperten zu einer stärkeren Aktivierung in Arealen kam, die insbesondere mit der Kontrolle von Arm- und Handbewegungen assoziiert werden (Dimitrova et al., 2006; Donchin et al., 2012; Grodd et al., 2001, Thickbroom et al., 2003), unterstützt diese Theorie, da der Arm und die Hand wichtige Körperregionen zur Antizipation der Schlagrichtung von Tennisschlägen darstellen (Williams et al., 2009). Die Aktivierung von Crus I und Crus II sowie Lobulus VI, VII und VIII spricht demnach dafür, dass Experten ihre eigenen motorischen Repräsentationen auch zur Vorhersage der Effekte beobachteter Bewegungen anhand der internen Modelle nutzen. Diese Theorie wird durch das Ergebnis der Post-hoc-Analyse bezüglich des Einflusses des Trainingsalters der Experten auf die Aktivierung während der Vorhersage der Schlagrichtung bekräftigt. So korrelierte das Trainingsalter der Tennisexperten mit der Aktivierung von Lobulus VIII des Cerebellums. Ein höheres Trainingsalter führte während der Antizipation zu einer stärkeren Aktivierung von Lobulus VIII. Gleichzeitig liefert dieses Ergebnis einen Hinweis darauf, dass motorisch-kognitive Prozesse im Cerebellum, wie die Effektvorhersage, durch Training moduliert werden können (Calvo-Merino et al., 2006). Bereits Lotze und Kollegen (2003) konnten in einer Studie mit erfahrenen Geigern zeigen, dass die Aktivierung von Arealen des Cerebellums während des Geige Spielens vom Trainingsalter der Musiker abhängig ist. Für Lotze et al. sprechen diese Ergebnisse für die trainingsinduzierte Plastizität der motorischen Repräsentationen der Bewegungen im Cerebellum (Schlaug, 2001).

Auf der Basis vorangegangener Studien wurde vor allem eine stärkere Aktivierung in parietalen und prämotorischen Arealen des AON erwartet. Und auch die Theorie der internen Modelle beschränkt sich nicht auf cerebelläre Strukturen und legt aufgrund von Verbindungen des Cerebellums mit den restlichen Arealen des AON eine Aktivierung dieser Strukturen nahe (Blakemore et al., 1998; Imamizu & Kawato, 2008; Miall, 2003; Ramnani, 2006). Wie angenommen führte die Vorhersage der Schlagrichtung bei den Experten im Vergleich zu den Novizen zusätzlich zur Aktivierung des Cerebellums auch zu einer stärkeren Aktivierung des IFG, des IPS sowie des SPL. Letzterer zeigte außerdem gemäß einer Post-hoc-Analyse eine signifikant stärkere Aktivierung bei denjenigen Experten, die die Tennisschläge besonders gut antizipierten.

Eine Studie von Imamizu und Kawato (2008) konnte zeigen, dass das Einbeziehen von Kontextinformationen bei der Handlungsplanung zu einer stärkeren Aktivierung des SPL führt. So resultierte die Präsentation von Hinweisreizen nur dann in einer Aktivierung des SPL, wenn die Probanden diesen Reiz nutzen konnten, um die nachfolgende, erforderte Handlung vorherzusagen. Des Weiteren ergab eine Konnektivitätsanalyse, dass der Einfluss des SPL auf die Aktivierung des Cerebellums höher war, wenn Kontextinformationen bei der Entscheidung für eine Handlung eine Rolle spielten. Imamizu und Kawato (2008) gehen daher davon aus, dass Kontextinformationen insbesondere im SPL verarbeitet werden und dieser im Anschluss die Initiierung und Kontrolle der Bewegung anhand der internen Modelle im Cerebellum beeinflusst. Diverse Studien aus dem Bereich der Expertiseforschung konnten außerdem zeigen, dass Experten bei der Antizipation von Handlungseffekten davon profitieren, wenn sie zusätzliche Kontextinformationen erhalten (Crognier & Féry, 2005; Farrow & Reid, 2012; McPherson & MacMahon, 2008; McRobert et al., 2011). Beispielsweise stieg die Antizipationsleistung von erfahrenen Tennisspielern signifikant an, wenn diese nicht nur die Bewegung des Gegenspielers zum Ball sondern auch den bisherigen Ballwechsel sahen, um die Richtung von Passierschlägen vorherzusagen (Crognier & Féry, 2005). Bei der Antizipation im Cricket führten zusätzliche Kontextinformationen ebenfalls zu einer besseren Vorhersageleistung (McRobert et al., 2011). Die Bedeutung von Kontextinformationen für die Antizipation von Handlungseffekten sowie die Ergebnisse der Studie von Imamizu und Kawato (2008) führen zu der Annahme, dass die stärkere Aktivierung des SPL der Experten in der Nutzung von Kontextinformationen begründet liegt. Da die Spieler in den verwendeten Stimulusvideos ihre Schläge von unterschiedlichen Positionen im Feld ausgeführt haben, könnte es sein, dass die Experten versucht haben die Position des Spielers in ihre Entscheidung für eine Schlagrichtung miteinzubeziehen. Viele andere Kontextinformationen, die in einem regulären Tennismatch verfügbar sind, wie zum Beispiel die Gewohnheiten des Gegners, waren in der vorliegenden Untersuchung nicht enthalten.

Die Verwendung von Kontextinformationen zur Vorhersage des Ziels einer beobachteten Handlung wird auch innerhalb des Predictive Coding Ansatzes diskutiert (Kilner et al., 2007). Dieser geht davon aus, dass die Erwartung des Beobachters der Ausgangspunkt für die Simulation einer Handlung ist. Der Tennisspieler nutzt demnach die verfügbaren Kontextinformationen als Basis für seine Simulation der beobachteten Bewegung mithilfe der eigenen motorischen Repräsentationen, um die motorischen Befehle vorherzusagen, die nötig sind, um das erwartete Ziel zu erreichen. Handelt es sich bei den verwendeten Kontextinformationen um

eine verlässliche Informationsquelle, kann der Vorhersagefehler reduziert und damit die Qualität der Vorhersage gesteigert werden. Ein Hinweis darauf, dass dieser Prozess im SPL stattfindet kommt von Wolpert und Kollegen (1998a), die eine Beteiligung des SPL an der Integration von motorischen und sensorischen Informationen zur internen Simulation einer Bewegung zeigen konnten. Im SPL werden die wahrgenommenen Informationen sowie die eigenen motorischen Befehle integriert, um den zukünftigen Status des eigenen Körpers und der Umwelt vorhersagen zu können (siehe Kap. 1.3.2). Wolpert und Kollegen (1998a) kommen zu dem Ergebnis, dass diese Integration innerhalb des SPL sowohl bei der Handlungsausführung als auch bei der Wahrnehmung eine wichtige Rolle spielt.

Eine Studie von Winstein und Kollegen (1997) konnte zeigen, dass steigende Ansprüche an die visuomotorische Verarbeitung, verursacht durch höhere Genauigkeitsanforderungen einer Bewegungsausführung, zu einer stärkeren Aktivierung des SPL führen. Auch Vallesi und Kollegen (2012) kamen zu dem Ergebnis, dass eine höhere Genauigkeit bei der Ausführung einer Bewegung in einer stärkeren Aktivierung des SPL resultiert. Da die Genauigkeitsanforderungen in der Antizipationsbedingung der vorliegenden Studie sehr hoch waren, besteht eine alternative Erklärung für die stärkere Aktivierung des SPL der Tennisexperten darin, dass erfahrene Tennisspieler bei der Simulation von beobachteten Tennisbewegungen stärker eigene Repräsentationen nutzen, die mit einer hohen Anforderung an die Genauigkeit einer Aufgabe assoziiert sind.

Zusätzlich zu den bereits berichteten Aktivierungen des Cerebellums sowie des SPL, kam es bei den Tennisexperten im Vergleich zu den Novizen während der Antizipation der Vorhandschläge auch zu einer stärkeren Aktivierung des IFG und des IPS. Der IPS wird von Tunik und Kollegen (2007) unter anderem mit der Vorbereitung von Bewegungen assoziiert. Als mögliche Funktionen des IFG werden in der Literatur vor allem das Erlernen von Bewegungssequenzen, die Bewegungsvorstellung sowie ebenfalls die Vorbereitung von Bewegungen diskutiert (Binkofski et al., 1999; Chambers et al., 2006; Johnson-Frey et al., 2003; Krams et al., 1998; Mecklinger et al., 2002; Uozumi et al., 2004). In der vorliegenden Studie scheint insbesondere die Vorbereitung von Bewegungen, in diesem Fall eine Reaktion auf den antizipierten Handlungseffekt, plausibel. Denn für Tennisexperten ist es von großer Bedeutung, die antizipierte Schlagrichtung immer mit einer schnellen angemessenen Reaktion zu kombinieren. Die stärkere Aktivierung des IFG und des IPS könnte daher mit der Vorbereitung der eigenen Reaktion auf die vorhergesagte Schlagrichtung in Verbindung stehen. Zu dieser Theorie einer frühzeitigen Handlungsvorbereitung passt die Annahme von Jakobs und

Kollegen (2009), nach der die Vorhersage gemäß dem Predictive Coding Ansatz auch verwendet wird, um die passende eigene Antwort auf eine beobachtete Handlung vorzubereiten. Für den Fall, dass die Vorhersage mit dem tatsächlichen Ergebnis der beobachteten Handlung übereinstimmt, ist die eigene Reaktion bereits vorbereitet und kann sofort ausgeführt werden (Jakobs et al.2009).

2.5.4 Der Einfluss unterschiedlicher Instruktionen auf die Aktivierung des Action Observation Networks während der Antizipation von Handlungseffekten

Neben der Untersuchung der allgemeinen Expertiseunterschiede während der Antizipation von Handlungseffekten hatte Experiment 1 das Ziel, den Einfluss von verschiedenen instruierten Antwortbedingungen sowohl auf die Antizipationsleistung als auch auf die neuronalen Prozesse zu bestimmen. Aus diesem Grund hatten die 32 Probanden der Studie während der Beobachtung der Tennisschläge entweder die Instruktion, die erwartete Flugrichtung des geschlagenen Balles anzugeben (links oder rechts, *Räumliche Antizipationsbedingung*) oder sich für eine eigene Antwort auf die beobachtete Bewegung zu entscheiden (Vorhand oder Rückhand, *Motorische Antizipationsbedingung*). Dabei ist zu beachten, dass die visuelle Stimulation in beiden Antwortbedingungen exakt identisch war. Die Probanden sahen jeden Schlag im Laufe des Experiments einmal mit der Aufgabe die Flugrichtung des Balles vorherzusagen und einmal mit der Instruktion die eigene Reaktion vorherzusagen. Unabhängig von der Instruktionsbedingung gaben die Probanden ihre Antwort indem sie die linke oder die rechte Taste der Antworttastatur drückten. Mögliche Aktivierungsunterschiede zwischen beiden Bedingungen aufgrund von Unterschieden in der visuellen Stimulation oder der Form des Tastendrucks können daher ausgeschlossen werden. Differenzen in den behavioralen oder den hirnhysiologischen Daten sind demnach auf die unterschiedlichen Instruktionen zurückzuführen und sind gleichzeitig die beste Möglichkeit zu untersuchen, ob in den unterschiedlichen Instruktionsbedingungen verschiedene Strategien zum Einsatz kamen. Eine Studie von Zentgraf und Kollegen (2005) hat gezeigt, dass verschiedene Instruktionen die Aktivierung des AON bei der Beobachtung von Bewegungen trotz identischer Stimuli beeinflussen können. So ergaben die Instruktionen zur anschließenden Vorstellung der Bewegung sowie zur anschließenden Bewertung der Bewegungsausführung eine stärkere Aktivierung in unterschiedlichen Teilen des SMA. Die Autoren gehen davon aus, dass die Instruktion und damit das Ziel der Bewegungsbeobachtung einen Top-Down-Einfluss auf die Aktivierung der eige-

nen motorischen Repräsentationen während der Bewegungsbeobachtung haben. Eine Verhaltensstudie von Farrow und Abernethy (2003) mit Tennisexperten und Novizen ergab, dass die Leistung bei der Antizipation von Tennisaufschlägen von der Art der Antwort moduliert wird und dieser Einfluss der Antwortart von der Expertise der Probanden abhängig ist. Tennisexperten zeigten eine bessere Antizipation der Schlagrichtung, wenn sie ihre Antwort nicht verbal sondern in Form einer tennisspezifischen Returnbewegung gaben. Nach Ansicht der Autoren sind diese Ergebnisse ein Hinweis darauf, dass der Unterschied in der Antizipationsleistung zwischen Experten und Novizen durch eine realitätsferne Antwortbedingung unterschätzt wird und die unterschiedliche Kopplung von Wahrnehmung und Handlung in Folge der verschiedenen Antwortbedingungen die Prozesse der Wahrnehmung beeinflusst.

Unabhängig vom Expertiseniveau der Probanden resultierte die Vorhersage der eigenen Antwort in Experiment 1 im Vergleich zur Vorhersage der Flugrichtung des Balles in einer stärkeren Aktivierung des IFG, des IPL (PGp, PGa) sowie des SPL (7M). Eine stärkere Aktivierung von motorik-assoziierten Arealen in der *Motorischen Antizipationsbedingung* passt sowohl zu den Ergebnissen von Zentgraf et al. (2005) als auch von Farrow und Abernethy (2003). Trotz identischer Stimuli resultierten die verschiedenen Instruktionen in einer unterschiedlichen Aktivierung von Arealen des AON und das auch bei der Vorhersage von Handlungseffekten und nicht nur bei der Bewegungsbeobachtung, wie dies von Zentgraf et al. (2005) untersucht wurde. Dass die Vorhersage einer angemessenen eigenen Reaktion zu einer stärkeren Aktivierung in IFG, IPL und SPL führte, unterstützt die Theorie einer stärkeren Kopplung von Wahrnehmung und Handlung in Folge einer realitätsnahen Reaktion (Bootsma 1989; Farrow & Abernethy, 2003). So sprechen die Ergebnisse von Experiment 1 für eine stärkere Nutzung motorik-assoziierteter Areale in der *Motorischen Antizipationsbedingung*, was auf eine stärker ausgeprägte Simulation in frontalen und parietalen Arealen des AON hindeutet (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013; Blakemore & Decety, 2001; Blakemore & Frith, 2005; Calvo-Merino et al., 2006; Caspers et al., 2010; Cross et al., 2009; Fontana et al., 2012; Gazzola & Keysers, 2009; Iacoboni et al., 2005; Miall, 2003; Oztop et al., 2005; Prinz, 2006; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Shmuelof & Zohary, 2007; Stadler et al., 2011). Der entgegengesetzte Kontrast, der Vergleich der *Räumlichen Antizipationsbedingung* mit der *Motorischen Antizipationsbedingung*, führte zu einer stärkeren Aktivierung des SPL (7A, 7P). Neben der Verarbeitung von Kontextinformationen wird der SPL auch mit vielen weiteren Funktionen assoziiert (für einen Überblick siehe beispielsweise Culham & Kanwisher, 2001; Culham & Valyear, 2006). So sehen diverse Autoren eine wichtige Funktion des SPL in der Verar-

beitung räumlicher Informationen (Corbetta & Shulman, 2002; Husain & Nachev, 2007; Husain & Rorden, 2003; Simon et al., 2004; für einen Überblick siehe Sack, 2009). Die stärkere Aktivierung des SPL im vorliegenden Experiment passt sehr gut zu diesen Ergebnissen, da sich die Vorhersage der Flugrichtung des Balles im Vergleich zur Vorhersage der eigenen Reaktion stärker auf die räumlichen Aspekte der Aufgabe bezieht.

Auf der Ebene der Verhaltensdaten wurde aufgrund der Ergebnisse von Farrow und Abernethy (2003) erwartet, dass die Vorhersage der eigenen Reaktion insbesondere bei den Tennisexperten zu einer besseren Antizipationsleistung führen sollte als die Vorhersage der Flugrichtung des Balles. Entgegen der Erwartung zeigte sich jedoch in Bezug auf die Anzahl der korrekten Antworten weder ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Antwortbedingungen noch eine Interaktion zwischen den Faktoren Expertise und Antwortbedingung. Außerdem brauchten die Probanden unabhängig von ihrer Expertise in der *Motorischen Antizipationsbedingung* signifikant länger um ihre Antwort zu geben. Dass in der vorliegenden Studie auf Verhaltensebene kein Vorteil für die *Motorische Antizipationsbedingung* gefunden wurde, könnte in den, im Vergleich zur Untersuchung von Farrow und Abernethy (2003), deutlich geringeren Unterschieden zwischen den beiden Antwortbedingungen begründet liegen. Bei Farrow und Abernethy (2003) hatten die Probanden entweder die Aufgabe ihre Antwort verbal oder in Form einer realen Reaktion auf dem Tennisplatz zu geben. Aufgrund der starken Limitation der Bewegungsmöglichkeiten in einer fMRT-Untersuchung wurde der Bezug zur eigenen Motorik in der vorliegenden Studie lediglich durch die Vorhersage der eigenen Antwort manipuliert. Die Ergebnisse von Experiment 1 weisen darauf hin, dass die Vorhersage der eigenen Reaktion zwar in einer stärkeren Aktivierung motorik-assoziierter Areale resultiert, jedoch gleichzeitig nicht ausreicht, um einen so starken Bezug zur eigenen Motorik herzustellen, dass dieser zu einer besseren Antizipationsleistung der Experten führt. Dies scheint nur der Fall zu sein, wenn die Antworten der Tennisexperten auf die beobachtete Bewegung der realistischen Reaktion entsprechen, die sie durch jahreslanges Training erlernt haben (Farrow & Abernethy, 2003).

Der Vergleich der hirnhysiologischen Ergebnisse zwischen den Tennisexperten und den Novizen ergab eine stärkere Aktivierung des vPMC, des SMA proper sowie des SPL in der Novizengruppe, wenn die Vorhersage der eigenen Reaktion mit der Vorhersage der Flugrichtung des Balles kontrastiert wurde. Die Experten zeigten bei diesem Kontrast der beiden Antwortbedingungen im Vergleich zu den Novizen hingegen keine stärkere Aktivierung. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass es vor allem bei den unerfahrenen Probanden durch

die *Motorische Antizipationsbedingung* zu einer stärkeren Nutzung motorik-assoziiierter Areale kam, weniger hingegen in der Gruppe der Tennisexperten. Betrachtet man den Kontrast zwischen den Antizipationsbedingungen in beiden Probandengruppen isoliert, zeigt sich noch deutlicher, dass die Vorhersage der eigenen Reaktion bei den Novizen zu deutlich größeren Aktivierungsunterschieden in Arealen des AON geführt hat als bei den erfahrenen Tennisspielern. In zwei Verhaltensstudien konnten Beilock und Kollegen (2002) durch die bewusste Aufmerksamkeitslenkung auf die Bewegungsausführung bei Experten einer Sportart zeigen, dass deren Bewegungsausführung automatisiert abläuft. Eine mögliche Erklärung für die geringen Unterschiede in der Aktivierung der Tennisspieler könnte sein, dass diese aufgrund einer ausgeprägten Kopplung zwischen Wahrnehmung und Handlung in beiden Bedingungen auf die gleiche automatisierte Strategie zurückgriffen und daher in beiden Bedingungen eine vergleichbare neuronale Aktivierung zeigten, während die Tennisnovizen ihre Vorhersagestrategie an die jeweilige Instruktion angepasst haben.

2.5.5 Limitationen

Trotz der sorgfältigen Auswahl der Experimentalbedingungen unterliegt die Interpretation der Ergebnisse Limitationen, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Die Vorhersage des weiteren Verlaufs der Trajektorie des Balles in der *Nur Ball Antizipationsbedingung* wurde eingesetzt, um eine Aussage über die Spezifität der Antizipationsleistungen der Tennisexperten treffen zu können. Damit die Aufgabenschwierigkeit der *Nur Ball Antizipationsbedingung* mit der Antizipation der Vorhandschläge vergleichbar ist, war diese für die *Nur Ball Antizipationsbedingung* in einer Vorstudie mit zehn unerfahrenen Probanden ermittelt worden. Die Probanden hatten dabei im Durchschnitt bei 75.71% ($SD = 10.86$) der Trials eine korrekte Antwort gegeben. Keiner der Probanden der Vorstudie nahm später auch an Experiment 1 teil. In diesem lag die Anzahl der korrekten Antworten nur bei 52.60 % und einer extrem hohen Standardabweichung von 23.56. Letztere ist mit durchschnittlichen Lösungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Probanden zwischen 4.17 % und 95.83 % zu erklären. Es konnte bisher jedoch keine Begründung gefunden werden, warum die Leistung der Probanden in Experiment 1 so stark von den Ergebnissen der Vorstudie abwich und zum Teil weit unterhalb der Ratewahrscheinlichkeit lag. Diese Probanden scheinen eine Strategie angewendet zu haben, die mit einem systematischen Fehler behaftet war. Da aufgrund der heterogenen Verhaltensdaten unklar ist, wie die Probanden die *Nur Ball Antizipationsbedingung* bearbeitet haben, sind die hirnelektrophysiologischen Ergebnisse dieser Bedingung nur eingeschränkt interpretierbar.

Um die Prozesse der Effekttantizipation während der Beobachtung der Tennisschläge zu isolieren, wurde die Vorhersage der Schlagrichtung mit der *Reinen Beobachtungsbedingung*, die keine Aufgabe zur Effektvorhersage beinhaltete, kontrastiert. Um spätere Aktivierungsunterschiede zwischen beiden Bedingungen auf die Prozesse der Effekttantizipation zurückführen zu können, wurde versucht alle anderen Eigenschaften der *Reinen Beobachtungsbedingung* wie in der *Tennis Antizipationsbedingung* zu gestalten. Doch obwohl beide Bedingungen die Beobachtung biologischer Bewegungen beinhalteten und in Bezug auf den Hintergrund, die Kameraposition, die Modelle und die Interaktion mit Ball und Schläger vergleichbar waren, unterschieden sich beide Bedingungen in Hinblick auf die erforderte Reaktion sowie die Aufgabenschwierigkeit. Während sich die Probanden bei der Antizipation der Schlagrichtung für die linke oder rechte Ecke respektive die eigene Vorhand oder Rückhand entscheiden mussten, wurden die Probanden bei der Beobachtung des Ballprellens bereits vor dem jeweiligen Video instruiert, welche Taste im Anschluss an das jeweilige Video zu drücken ist und mussten ihre Antwort dementsprechend nicht auf Basis der beobachteten Bewegung auswählen. Die Anforderungen bezüglich der Reaktion führten außerdem zu unterschiedlichen Aufgabenschwierigkeiten. So gaben in der Beobachtungsbedingung alle Probanden in jedem der 24 Trials eine korrekte Antwort, bei der Vorhersage der Vorhandschläge im Mittel bei 64 % der 96 Videos. Für den Fall, dass die Aktivierung des AON von der Aufgabenschwierigkeit abhängig ist, wäre für den Vergleich der Antizipation zwischen den Experten und den Novizen eine stärkere Aktivierung des AON der Novizen zu erwarten, da diese eine signifikant schlechtere Antizipationsleistung zeigen. Der Vergleich zwischen den beiden Probandengruppen ergab jedoch lediglich eine stärkere Aktivierung des AON der Tennisexperten (siehe Kap. 2.5.3). Des Weiteren war die Aktivierung in Teilen des AON positiv mit der Antizipationsleistung korreliert. Ein Aktivierungsunterschied in Arealen des AON aufgrund von Schwierigkeitsunterschieden zwischen den Bedingungen erscheint daher unwahrscheinlich. In Hinblick auf die diskutierten Limitationen der *Reinen Beobachtungsbedingung* ist zu beachten, dass diese für den Vergleich der Expertisegruppen keine Rolle spielen, da in beiden Gruppen die Antizipation der Vorhandschläge zunächst mit der *Reinen Beobachtungsbedingung* kontrastiert wurde. Denn Aktivierungsunterschiede zwischen den Bedingungen, die in beiden Gruppen vergleichbar waren, wie zum Beispiel die Unterschiede bezüglich der erforderen Reaktion, wurden im anschließenden Gruppenvergleich kontrastiert und somit entfernt. Abschließend ist anzumerken, dass eine vergleichbare Kontrollbedingung in diversen Studien zur Untersuchung der neuronalen Prozesse der Effekttantizipation im Sport eingesetzt wurde (Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011).

2.5.6 Fazit

Mit einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON unabhängig von der Expertise der Beobachter während der Effektvorhersage konnte Experiment 1 die Resultate zahlreicher vorheriger Studien replizieren (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013; Bishop et al., 2013; Stadler et al., 2012; Urgesi et al., 2010; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011) und die Bedeutung des AON zur Vorhersage von Handlungseffekten unterstreichen. Eine bessere Antizipationsleistung der Experten im Vergleich zu den unerfahrenen Novizen konnte ebenfalls repliziert werden (für einen Überblick siehe Williams et al., 2011). Die stärkere Aktivierung des Cerebellums sowie des SPL, des IFG und des IPS der Experten während der Effektvorhersage deutet darauf hin, dass Experten ihre eigenen motorischen Repräsentationen, die sie im Laufe der Jahre erworben haben, nutzen, um die Schlagrichtung zu antizipieren. Diese Vorhersage der Experten basiert gemäß der Predictive Coding Theorie auf einer initialen Erwartung auf Basis der Vorerfahrungen sowie der verfügbaren Kontextinformationen, die mithilfe einer Simulation in den eigenen motorischen Repräsentationen zu einer Vorhersage des Handlungseffekts führt. Der Vorhersageprozess ist dabei insbesondere mit den Arealen des Cerebellums sowie parietalen Arealen assoziiert, die auch genutzt werden, um den Effekt von eigenen Bewegungen vorherzusagen. Gleichzeitig wird im IFG eine angemessene Antwort auf die antizipierte Schlagrichtung vorbereitet, um eine schnellstmögliche Reaktion zu gewährleisten. Außerdem konnten die Ergebnisse von Experiment 1 zeigen, dass unterschiedliche Instruktionen die Aktivierung während der Effektantizipation beeinflussen und dass dieser Einfluss von der Expertise des Beobachters abhängig ist. Die *Motorische Antizipationsbedingung* führt dabei insbesondere bei den unerfahrenen Probanden zu einer stärkeren Nutzung motorik-assoziierter Areale.

3 Experiment 2 – Effekttantizipation von Tennis- und Volleyballexperten³

3.1 Fragestellung

Experiment 1 hat gezeigt, dass Areale des AON für die Vorhersage von Handlungseffekten genutzt werden und die Stärke der Aktivierung des AON dabei von der Expertise der Beobachter abhängig ist. So ergab der Vergleich zwischen den Tennisexperten und den Novizen eine höhere Aktivierung des IFG, des PMC, des SPL sowie des Cerebellums bei den erfahreneren Probanden. Besonders bemerkenswert ist dabei die im Vergleich zu den Novizen signifikant stärkere Aktivierung in Arealen des Cerebellums, die vor allem mit der Ausführung von Bewegungen assoziiert werden und in vorherigen Studien zur Untersuchung der neuronalen Prozesse der Effekttantizipation nicht im Fokus der Autoren lagen. Experiment 2 hat daher das Ziel, die Beteiligung des AON und insbesondere des Cerebellums an der Vorhersage von Handlungseffekten in einem weiteren Expertisevergleich zu untersuchen und neue Erkenntnisse bezüglich der Theorie einer Nutzung interner Modelle zur Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen zu gewinnen. Außerdem soll das zweite Experiment der Frage nachgehen, ob Experten einer Sportart auch bei der Antizipation in anderen Sportarten von ihren erworbenen motorischen Repräsentationen profitieren und sie ihre Antizipationsfähigkeiten somit auch auf andere Situationen transferieren können. So wurde in bisherigen Studien weder systematisch untersucht, ob Experten auch in anderen Sportarten eine überdurchschnittliche Antizipationsleistung zeigen, noch wurde ermittelt, ob es bei Experten während der Effekttantizipation in einer Sportart, für die sie keine Expertise besitzen, zu einer vergleichbaren Aktivierung des AON kommt. In einer Studie von Aglioti und Kollegen (2008) zeigten die Basketballexperten nur bei der Antizipation der Freiwürfe eine spezifische Veränderung der kortikalen Erregbarkeit der Repräsentation der Fingermuskulatur, nicht aber bei der Vorhersage von Strafstoßen im Fußball. Jedoch stellen Fingerbewegungen in der Fußballbedingung keinen leistungsbestimmenden Aspekt dar. Durch die großen Unterschiede zwischen den Sportarten und die fehlenden Verhaltensdaten der Fußballbedingung ist die Aus-

³ Balser, Lorey, Pilgramm, Stark, Zentgraf, Williams & Munzert (2014): The influence of expertise on brain activation of the Action Observation Network during anticipation of tennis and volleyball serves. *Frontiers in Human Neuroscience*, in Vorbereitung.

sagekraft der Ergebnisse bezüglich eines möglichen Transfers der Antizipationsfähigkeiten sehr beschränkt.

Um sowohl einen Vergleich zwischen Experten und Novizen bei der Antizipation von Handlungseffekten zu ermöglichen, als auch den Transfer der Antizipationsleistungen auf eine andere Sportart zu untersuchen, wurde ein Design in Anlehnung an die Studie von Calvo-Merino und Kollegen (2005) gewählt. An der Studie nehmen Tennis- und Volleyballexperten teil, die alle die Aufgabe haben die Richtung von Aufschlägen aus beiden Sportarten vorherzusagen. Das Design von Experiment 2 unterscheidet sich damit entscheidend von Experiment 1 sowie weiteren Studien, die zuvor den Unterschied zwischen Experten und Novizen untersucht hatten. In diesen wurde die Effektantizipation von Experten in einer spezifischen Sportart mit Novizen kontrastiert, die weder in der untersuchten Disziplin noch in einer anderen Domäne Expertise aufwiesen. In der vorliegenden Studie werden hingegen zwei Expertengruppen verglichen, die beide spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besitzen, aber gleichzeitig keine Vorerfahrungen in der jeweils anderen Sportart vorweisen können. Da beiden Gruppen auch die Stimuli der nicht beherrschten Sportart präsentiert werden, bilden die Experten somit auch die Novizengruppe in der jeweils anderen Bedingung. Demnach ist es durch die zwei unterschiedlichen Expertisegruppen möglich den Einfluss von sportartspezifischer Expertise als auch den Transfer der Antizipationsleistungen auf eine andere Sportart zu untersuchen.

3.2 Hypothesen

Basierend auf den Ergebnissen von Experiment 1 sowie den bereits beschriebenen Ergebnissen vorheriger Studien ist zu erwarten, dass die Experten in ihrer jeweiligen Expertisesportart eine bessere Antizipationsleistung zeigen als in der nicht beherrschten Disziplin. Weiterhin sollte die Antizipation der Aufschlagrichtung expertise- und stimulusunabhängig zu einer stärkeren Aktivierung von Arealen des AON führen als die reine Bewegungsbeobachtung. Wie in der vorangegangenen Studie sollte diese Aktivierung von der Antizipationsleistung der Probanden abhängig sein. Für den Vergleich der Gehirnaktivierung während der Antizipation der Aufschlagrichtung in der jeweiligen Expertisesportart mit der Vorhersage in der nicht beherrschten Sportart wird eine stärkere Aktivierung in Arealen des AON erwartet. Gemäß den Ergebnissen von Experiment 1 sollte sich der Expertiseunterschied dabei insbesondere in Arealen des Cerebellums zeigen.

Bezüglich der Frage, ob die erworbenen Antizipationsfähigkeiten sowie die eigenen motorischen Repräsentationen ausschließlich für die eigene Disziplin verwendet werden oder ein Transfer stattfindet, könnten unterschiedliche Ergebnisse erwartet werden. Da Experten insbesondere kinematische Informationen der zu antizipierenden Bewegung nutzen und dabei womöglich auf eigene Repräsentationen der jeweiligen Handlung zurückgreifen, ist aufgrund der sportartspezifischen Bewegungen nicht zu erwarten, dass es bei der Antizipation zu Transfereffekten kommt. Davon ist vor allem auszugehen, wenn eine Simulation gemäß der Direct Matching Theorie angenommen wird (Rizzolatti & Craighero, 2004). Andererseits könnten Bewegungen auf verschiedenen Ebenen simuliert werden, wie dies die Predictive Coding Theorie von Kilner et al. (2007) diskutiert. Die höheren, abstrakteren Hierarchieebenen könnten auch für andere Sportarten genutzt werden und so zu Transfereffekten führen. Da für die fremde Sportart auf der Ebene der motorischen Repräsentationen keine exakten Informationen vorhanden sind, ist jedoch fraglich, ob der Transfereffekt auch in vergleichbaren Verhaltensdaten resultiert.

3.3 Methode

3.3.1 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen an der vorliegenden Studie 34 Personen teil. Drei Probanden wurden jedoch von der Analyse der Daten ausgeschlossen, da die gemessenen Kopfbewegungen dieser drei Probanden außerhalb des tolerierten Bereichs lagen. Keiner der Teilnehmer hatte zum Zeitpunkt der Studiendurchführung oder in der Vergangenheit eine neurologische oder psychiatrische Erkrankung. Gemäß des Edinburgh Inventory of Handedness (Oldfield, 1971) zeigten alle Probanden eine dominante Nutzung der rechten Hand. Die Stichprobe der Studie setzte sich aus 15 Tennisexperten sowie 16 Volleyballexperten zusammen, wobei beide Untergruppen jeweils acht weibliche Teilnehmerinnen beinhalteten. Die Expertengruppen setzten sich im Tennis aus Spielern der vier höchsten deutschen Ligen und im Volleyball aus Spielern der drei höchsten deutschen Ligen zusammen. Bereits bei der Probandenakquise wurde sichergestellt, dass die Probanden keine Expertise in der jeweils anderen Sportart aufwiesen. Das durchschnittliche Trainingspensum der Tennisexperten lag bei 3.3 Einheiten pro Woche ($SD = 1.79$), die Volleyballexperten absolvierten im Mittel 2.8 Einheiten ($SD = 0.75$). Bei einem durchschnittlichen Trainingsalter von 16.67 Jahren ($SD = 5.94$) hatten die Tennisexperten in ihrer bisherigen Karriere im Mittel 461 Wettkampfs Spiele ($SD = 222.32$) absolviert. Die Volleyballexperten hatten in $M = 12.69$ Jahren ($SD = 5.94$) im Durchschnitt 343

Wettkampfspiele bestritten ($SD = 214.69$). T -Tests zwischen den beiden Gruppen ergaben keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der beschriebenen expertisespezifischen Merkmale Trainingshäufigkeit, Trainingsalter und absolvierte Wettkampfspiele. Auch das Lebensalter der Volleyballspieler unterschied sich mit 25.69 Jahren ($SD = 4.19$) nicht signifikant von der Gruppe der Tennisspieler ($M = 23.87$ Jahre, $SD = 5.26$). Entlohnt wurden die Teilnehmer mit einer monetären Aufwandsentschädigung. Die Studie wurde von der lokalen Ethikkommission des Fachbereichs für Psychologie und Sportwissenschaft der Justus-Liebig-Universität genehmigt. Zusätzlich gaben alle Probanden ihr schriftliches Einverständnis für die Teilnahme an der Studie gemäß der Vereinbarung von Helsinki.

3.3.2 Stimulusmaterial

Für die vorliegende Studie wurden 32 Tennis- sowie 32 Volleyballaufschläge aufgezeichnet. Zusätzlich wurden jeweils 32 Videoclips der Tennis- und Volleyballspieler beim Ballprellen aufgenommen. Bei der Aufzeichnung der Stimuli kamen in beiden Sportarten jeweils eine Spielerin und ein Spieler zum Einsatz, die das gleiche Leistungsniveau aufwiesen, wie die Experten der jeweiligen Sportart, die an der Studie teilnahmen. Die Modelle waren, genau wie alle 31 teilnehmenden Probanden, rechtshändig. Die Aufzeichnung der Tennisstimuli fand in einer Tennishalle statt, die auch zur Austragung von Wettkampfspielen genutzt wird. Die Videokamera (Basler avA 1600 – 50gc) wurde auf Höhe der Grundlinie so positioniert, dass der Bildausschnitt den Blickwinkel des Return spielenden Gegenspielers simuliert (siehe Abb. 10A+B). Die Tennisaufschläge wurden alle von der linken Aufschlagseite in das rechte Aufschlagfeld der gegnerischen Hälfte geschlagen. Für die Aufnahmen wurden in der Spielfeldhälfte, in welcher auch die Videokamera platziert war, Zielzonen (jeweils 50×640 cm) mit einem Abstand von 3.62 Metern markiert. Welche der beiden Zielzonen zu treffen war, wurde den Spielern vor jedem Schlag durch den Aufnahmeleiter mitgeteilt. Bei der späteren Versuchsdurchführung wurden dann lediglich Videoclips von erfolgreichen Aufschlägen in diese beiden Zielzonen verwendet. Wie auf der schematischen Abb. 11A zu sehen ist, waren diese so gewählt, dass die Spieler Aufschläge nach innen (in die linke Ecke des Aufschlagfeldes) und nach außen (in die rechte Ecke des Aufschlagfeldes) ausführen mussten. Die Verteilung von Tennisaufschlägen nach innen und außen war dabei mit jeweils 16 Schlägen ausgeglichen.

Auch die Volleyballstimuli wurden in einer Sporthalle aufgezeichnet, die zur Austragung von Wettkampfspielen genutzt wird. Die Videokamera (Basler avA 1600 – 50gc) wurde dabei so

im Volleyballfeld positioniert, dass der Bildausschnitt den Blickwinkel des annehmenden Spielers auf der Spielposition 6 simuliert (siehe Abb. 10C+D). Die Volleyballaufschläge wurden gemäß den Gepflogenheiten der Sportart alle von der Spielfeldposition 1 aus in die gegnerische Feldhälfte geschlagen. Auch für die Aufnahmen der Volleyballaufschläge wurden in der Spielfeldhälfte, in welcher auch die Videokamera platziert war, Zielzonen (jeweils 100×640 cm) markiert, ebenfalls mit einem Abstand von 3.62 Metern. Der Abstand der Trefferzonen wurde für beide Sportarten identisch gewählt, so dass der Winkelunterschied zwischen Schlägen nach links und rechts in beiden Sportarten vergleichbar war. Lediglich die Breite der Zielzonen wurde für die Volleyballaufschläge aufgrund des deutlich größeren Balls breiter gestaltet. Welche der beiden Zielzonen zu treffen war, wurde den Spielern wie bei den Tennisaufnahmen vor jedem Schlag durch den Aufnahmeleiter mitgeteilt. Bei der späteren Versuchsdurchführung wurden dann ebenfalls nur Videoclips von erfolgreichen Aufschlägen verwendet. Wie auf der schematischen Abb. 11B zu sehen ist, waren diese so gewählt, dass die Spieler Aufschläge links und rechts des Annahmespielers beziehungsweise der in der Mitte positionierten Kamera platzieren mussten. Mit jeweils 16 Schlägen war die Verteilung von Volleyballaufschlägen nach links und rechts dabei ebenfalls ausgeglichen. Sowohl die Videoclips der 32 Tennisaufschläge, als auch die der 32 Volleyballaufschläge wurden zum Zeitpunkt des Ball-Schläger- respektive Ball-Hand-Kontakts gestoppt. Es war demnach keine Information über die Flugbahn des Tennis- beziehungsweise Volleyballs verfügbar.

Weiterhin wurden bei gleichen Aufnahmebedingungen in beiden Sportarten jeweils 32 Videoclips erstellt, die einen der beiden Spieler beim Ballprellen zeigten. Die Spieler standen hierzu an der gleichen Position des Feldes, von der sie auch den Aufschlag ausgeführt hatten, und prellten den Tennis- beziehungsweise Volleyball mit dem Tennisschläger respektive mit ihrer rechten Hand. Im gesamten Experiment wurden somit 128 Stimulusvideos mit einer Länge zwischen 2.9 und 4.6 s verwendet. Die Variation in der Dauer der Videos lag dabei insbesondere in der unterschiedlichen Bewegungsdauer der Tennis- und Volleyballspieler in den einzelnen Videoclips begründet. Alle Stimuli wurden in einer Auflösung von 720×576 Pixeln mit 35 Bildern pro Sekunde über einen LCD-Projektor (Epson EB-G5600) im Nebenraum auf eine 460×350 mm große Leinwand projiziert, welche am Kopfende des Kernspintomographen positioniert war. Mithilfe eines Doppelspiegels, der an der Kopfspule befestigt war, konnten die Versuchsteilnehmer die Projektionsfläche trotz ihrer liegenden Position einsehen. Das visuelle Feld betrug dabei 188 mm in horizontaler und 168 mm in vertikaler Ausrichtung, was einem Blickwinkel von 18° respektive 11° entsprach. Zur Steuerung des Expe-

perimentalablaufs sowie zur Präsentation der Stimuli wurde die Software Presentation (Version 12.9, Neurobehavioral Systems, Albany, USA) verwendet.

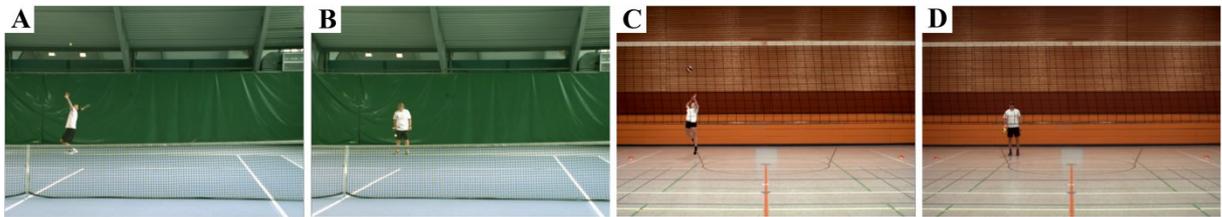


Abb. 10 Beispielhafte Darstellung der Videostimuli aller vier Bedingungen. (A) Tennisaufschlag des männlichen Tennismodells (*Tennis Antizipationsbedingung*). (B) Weibliches Tennismodell beim Ballprellen mit dem Tennisschläger (*Tennis Beobachtungsbedingung*). (C) Volleyballaufschlag des weiblichen Volleyballmodells (*Volleyball Antizipationsbedingung*). (D) Männliches Volleyballmodell beim Ballprellen mit der Hand (*Volleyball Beobachtungsbedingung*).

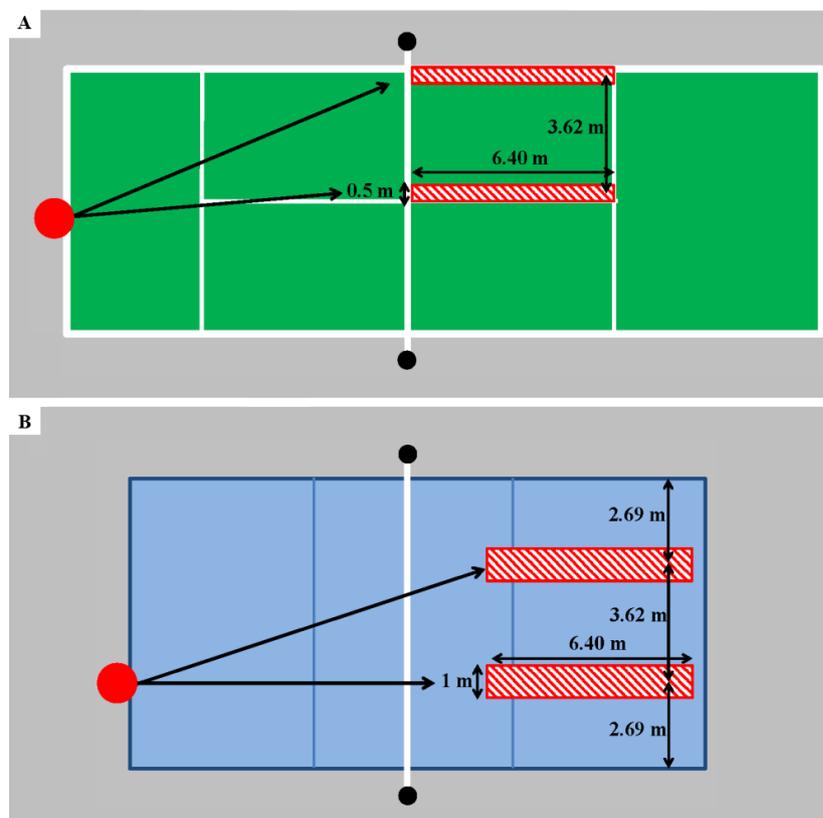


Abb. 11 Schematische Darstellung der Zielzonen für die Tennis- (A) und die Volleyballaufschläge (B), die von den Modellen getroffen werden mussten. Es wurden ausschließlich Treffer dieser Zonen als Stimuli für die Antizipationsbedingungen verwendet.

3.3.3 Aufgabe und Instruktionen

Die Probanden hatten im Laufe des Experiments die Aufgabe, auf vier unterschiedliche Versuchsbedingungen zu reagieren. In der *Tennis Antizipationsbedingung* beobachteten die Probanden 32 Aufschläge der beiden Tennisspieler mit der Aufgabe, die Schlagrichtung zu antizipieren und daraufhin die erwartete Flugrichtung des Balls anzugeben. Ihre Antwort gaben sie dabei mit der linken und rechten Taste einer mit zwei Knöpfen ausgestatteten Antwortbox. Die linke Taste entsprach bei dieser Bedingung einem Aufschlag auf die Innenseite des Aufschlagfeldes und damit einem Ball, der von ihnen aus gesehen nach links flog, die rechte Taste einem Ball nach außen und somit einem Ball, der von ihnen aus gesehen nach rechts geschlagen wurde. In der *Volleyball Antizipationsbedingung* beobachteten die Probanden 32 Aufschläge der beiden Volleyballspieler, ebenfalls mit der Aufgabe, die Schlagrichtung zu antizipieren und daraufhin die erwartete Flugrichtung des Balls anzugeben. Die Probanden konnten dabei zwischen einem Aufschlag, der von ihnen aus gesehen nach links und einem Aufschlag, der von ihnen aus gesehen nach rechts flog, wählen. Für den Fall, dass sie sich für einen Aufschlag nach links entschieden drückten sie die linke Taste, bei einem Aufschlag nach rechts entsprechend die rechte Taste.

Um den Effekt der visuellen Stimulation, der Beobachtung einer biologischen Bewegung und des Tastendrucks auf die neuronale Aktivierung zu kontrollieren, wurden zwei reine Beobachtungsbedingungen eingesetzt (*Tennis Beobachtungsbedingung*, *Volleyball Beobachtungsbedingung*), bei denen diese Aspekte weitestgehend den Antizipationsbedingungen der jeweiligen Sportart entsprachen. Diese Beobachtungsbedingungen beinhalteten Bewegungen der gleichen Modelle bei identischem Bildausschnitt und Hintergrund und erforderten ebenfalls einen Tastendruck am Ende des Videoclips. Die Probanden hatten dabei die Aufgabe, die Tennis- beziehungsweise Volleyballspieler beim Ballprellen zu beobachten und direkt nach dem Videoclip die linke oder rechte Taste zu drücken. Welche der beiden Tasten zu drücken war, wurde vor jedem Trial durch einen entsprechenden Instruktionstext vorgegeben. Demnach erforderten alle vier Versuchsbedingungen eine motorische Antwort im Anschluss an das jeweilige Stimulusvideo. Die Verteilung der erforderten, korrekten Reaktionen war in allen vier Bedingungen mit 50 % links und 50 % rechts ausgeglichen. Die exakten Instruktionen, die den Probanden im Kernspintomographen präsentiert wurden, sind in Tab. 7 aufgelistet.

Tab. 7 Instruktionen der vier verschiedenen Experimentalbedingungen in Experiment 2.

Bedingung	Instruktion
<i>Tennis Antizipationsbedingung</i>	„Wohin wird der aufgeschlagene Ball fliegen, in die linke oder rechte Ecke des Aufschlagfeldes? Drücken Sie nach dem Video die linke oder rechte Taste!“
<i>Volleyball Antizipationsbedingung</i>	„Wohin wird der aufgeschlagene Ball fliegen, auf die linke oder rechte Seite des Spielfeldes? Drücken Sie nach dem Video die linke oder rechte Taste!“
<i>Tennis Beobachtungsbedingung</i>	„Beobachten Sie den Tennisspieler beim Ballprellen! Drücken Sie nach dem Video die linke Taste!“ „Beobachten Sie den Tennisspieler beim Ballprellen! Drücken Sie nach dem Video die rechte Taste!“
<i>Volleyball Beobachtungsbedingung</i>	„Beobachten Sie den Volleyballspieler beim Ballprellen! Drücken Sie direkt nach dem Video die linke Taste!“ „Beobachten Sie den Volleyballspieler beim Ballprellen! Drücken Sie direkt nach dem Video die rechte Taste!“

3.3.4 Versuchsablauf

Die Vorbereitungsphase der Versuchsteilnehmer war mit Ausnahme des ausgehändigten Fragebogens zur Tennisexpertise mit der beschriebenen Vorbereitung der Studie Tennisexperten vs. Novizen identisch (siehe Kap. 2.3.4). Dieser Fragebogen umfasste in der vorliegenden Studie nicht nur das Trainingspensum, die aktuelle und höchste Spielklasse sowie die absolvierten Wettkampfs Spiele für die Sportart Tennis, sondern ebenfalls für die Sportart Volleyball. Während der funktionellen Magnetresonanztomographie absolvierten die Versuchsteilnehmer 128 Trials, was bei einer durchschnittlichen Trialdauer von 16 s zu einer Experimentaldauer von 34 min führte. Jeder Trial begann dabei mit einem einsekündigen schwarzen Bildschirm, gefolgt von einem dreisekündigen Instruktionstext sowie einem weißen Fixationskreuz auf schwarzem Hintergrund für weitere 5 s. Das anschließend präsentierte Stimulusvideo hatte eine Länge zwischen 2.9 und 4.6 s. Direkt nach der Präsentation des Videos wurde der Bild-

schirm schwarz und die Probanden hatten ab diesem Zeitpunkt 3 s Zeit, um ihre Antwort durch Drücken der linken oder rechten Taste der Antworttastatur mit ihrem Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand zu geben. Sobald eine Taste gedrückt wurde, wurde die gegebene Antwort für die verbleibende Zeit der dreisekündigen Antwortphase auf dem Bildschirm angezeigt. Rückmeldung über ihre Leistung erhielten die Probanden hingegen erst nach Abschluss des Experiments in Form eines Durchschnittswerts für jede der vier Experimentalbedingungen. Die Reihung der 128 Trials erfolgte für jede Versuchsperson randomisiert (zum Ablauf der Messung siehe auch Abb. 12).

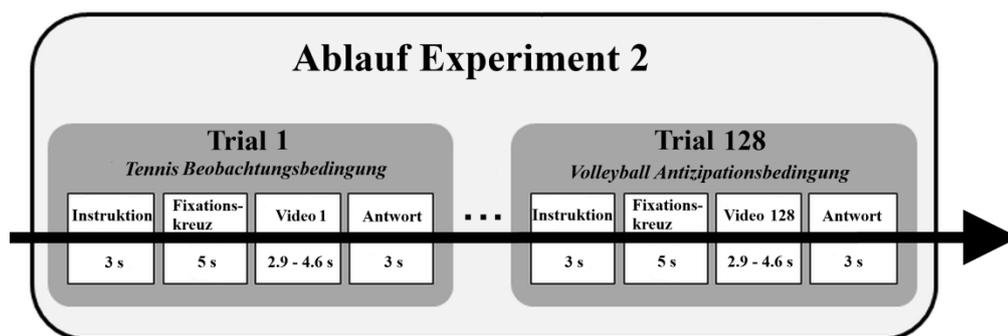


Abb. 12 Aufbau und Ablauf der 128 Experimentaltrials. Jeder Trial startete mit der Präsentation eines Instruktionbildschirms, gefolgt von einem Fixationskreuz, einem Videostimulus sowie der anschließenden Antwortphase. Die Verteilung der Videostimuli erfolgte dabei für alle Probanden randomisiert.

3.3.5 Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der Verhaltensdaten

Die Verhaltensdaten der vorliegenden Studie wurden auf die gleiche Art wie bei Studie 1 erhoben (siehe Kap. 2.3.5). Um den Einfluss der Expertisesportart auf die Anzahl der korrekten Antworten zu untersuchen, wurde unter Verwendung der Software SPSS (Version 18, SPSS Inc., Chicago, USA) eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Expertisesportart (Tennisexperte, Volleyballexperte) und Antwortbedingung (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Volleyball Antizipationsbedingung*) mit Messwiederholung auf dem Faktor Antwortbedingung gerechnet. Die gleiche Analyse kam weiterhin auch zur Berechnung des Einflusses dieser beiden Faktoren auf die Antwortzeit zum Einsatz. Zusätzlich wurde in beiden Expertisegruppen sowohl für die *Tennis* als auch für die *Volleyball Antizipationsbedingung* durch einen *t*-Test bestimmt, ob die Anzahl korrekter Antworten signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 % lag.

3.3.6 Datenaufzeichnung und statistische Auswertung der fMRT-Daten

Mit Ausnahme der Anzahl der Volumes entsprachen die Parameter der Sequenzen zur Erhebung der anatomischen und hirnpfysiologischen Daten ebenfalls der vorangegangenen, in Kapitel 2.3.6 beschriebenen Untersuchung. Aufgrund der etwas kürzeren Experimentalzeit der vorliegenden Untersuchung ergaben sich für die EPI-Sequenz eine Volumenanzahl von 816 und damit eine Dauer der funktionellen Messung von exakt 34 min. Auch bei dieser Studie wurden die ersten beiden Aufnahmen direkt nach der Aufnahme verworfen.

Preprocessing

Sowohl für die Daten des gesamten Cortex Cerebri, als auch für die Daten des Cerebellums, die mithilfe der SUI-Toolbox ausgewertet wurden (Diedrichsen, 2006), entsprachen die einzelnen Schritte des Preprocessings der bereits beschriebenen Studie zum Vergleich von Tennisexperten und Novizen (siehe Kap. 2.3.6).

First-Level-Analyse

In der First-Level-Analyse beschränkten sich die Unterschiede zwischen den beiden beschriebenen Studien auf die Regressoren, die durch das ALM modelliert wurden, um den Einfluss der Experimentalbedingungen auf die gemessene neuronale Aktivität vorherzusagen (siehe Kap. 2.3.6). In der vorliegenden Studie waren dies die korrekten und inkorrekten Trials der vier verschiedenen Experimentalbedingungen (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Volleyball Antizipationsbedingung*, *Tennis Beobachtungsbedingung*, *Volleyball Beobachtungsbedingung*; analysiert wurde hierbei jeweils die Phase der Videopräsentation), die Instruktionsphasen, sowie die dreisekündigen Antwortphasen. Zusätzlich wurden auch in dieser Studie die sechs Bewegungsparameter in das ALM als Regressoren eingeführt und ein High-Pass-Filter mit einem Grenzwert von 128 s verwendet.

Second-Level-Analyse

In der Second-Level-Analyse wurden dann Vergleiche zwischen verschiedenen Bedingungen (One-Sample-*t*-Test) auf Gruppenebene durchgeführt. Mit dem Ziel, die in der ersten Studie gefundene AON Aktivierung während der Antizipation von Handlungseffekten unabhängig von der Expertise zu replizieren, wurde ein One-Sample-*t*-Test für den Kontrast *Effektantizipationsbedingung* (*Tennis Antizipationsbedingung* + *Volleyball Antizipationsbedingung*) > *Reine Beobachtungsbedingung* (*Tennis Beobachtungsbedingung* + *Volleyball Beobachtungs-*

bedingung) für alle 31 Probanden gerechnet. Die Signifikanzschwelle für diesen Kontrast betrug $p < .05$, unter Anwendung einer FWE-Korrektur auf den gesamten Cortex Cerebri beziehungsweise auf die im SUIT-Template enthaltenen Voxel im Falle der gesonderten Cerebellum-Auswertung. Zeigten Voxel bei diesem Kontrast eine signifikante Aktivierung, wurde den lokalen Aktivierungsmaxima anschließend eine neuronale Struktur zugewiesen (für genauere Informationen siehe Kap. 2.3.6). Für diesen Kontrast wurde eine Ganzkopfanalyse mit FWE-Korrektur ($p < .05$) gewählt, da der Vergleich der Effektantizipation mit der reinen Bewegungsbeobachtung in beiden Sportarten zusammen für alle 31 Probanden sehr starke Aktivierungsunterschiede erwarten ließ. Eine konservative FWE-korrigierte Ganzkopfauswertung erschien daher angemessen.

Um den Einfluss der spezifischen Expertise auf die neuronale Aktivität während der Antizipation von Handlungseffekten zu untersuchen, wurde der Kontrast (*Antizipation Expertisesportart* > *Beobachtung Expertisesportart*) > (*Antizipation Nicht-Expertisesportart* > *Beobachtung Nicht-Expertisesportart*) für alle 31 Probanden verwendet. Zusätzlich zu den beschriebenen Kontrasten wurden parametrische Analysen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter, die sich aus den Personen- und Verhaltensdaten der Studie ergaben, zu bestimmen. Zum einen sollte die Frage beantwortet werden, ob die Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation von Handlungseffekten durch die Antizipationsleistung moduliert wird. Dazu wurde ein Parameter „Antizipationsleistung beide Sportarten“ für den One-Sample-*t*-Test des Kontrasts (*Tennis Antizipationsbedingung* + *Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung* + *Volleyball Beobachtungsbedingung*) für alle 31 Probanden eingeführt. Um den Einfluss der Antizipationsleistung auch in der jeweiligen Expertisesportart zu bestimmen, wurde zusätzlich ein Parameter „Antizipationsleistung Expertisesportart“ für den One-Sample-*t*-Test des Kontrasts *Expertisesportart Antizipation* > *Expertisesportart Beobachtung* für alle 31 Probanden eingefügt. Zum anderen sollte in der parametrischen Analyse die Frage adressiert werden, ob das Trainingsalter der Experten einen Einfluss auf die Aktivierung während der Antizipation der Aufschläge aufweist. In diesem Fall wurde der Parameter „Trainingsalter in Jahren“ für den One-Sample-*t*-Test des Kontrasts *Expertisesportart Antizipation* > *Expertisesportart Beobachtung* für alle 31 Probanden eingeführt.

Gemäß den formulierten Hypothesen erwarteten wir während der Antizipation von Handlungseffekten in Abhängigkeit des Expertiseniveaus für die jeweilige Sportart sowie in Abhängigkeit von der Antizipationsleistung Aktivierungsunterschiede in Arealen des AON.

Daher wählten wir für die parametrischen Auswertungen und für die Kontraste, in denen die Antizipation in der Expertisesportart mit der Antizipation in der nicht beherrschten Sportart verglichen wurde, eine ROI-Analyse mit apriori definierten Suchmasken als Auswertungsverfahren. Die Auswahl der Areale für diese ROI-Analyse war für alle gerechneten Kontraste identisch und beruhte auf den Ergebnissen der Metaanalyse von Caspers et al. (2010), sowie den Ergebnissen der ersten Studie zum Vergleich der Tennisexperten mit Novizen. Enthalten waren der IPL, der IPS, der SPL, der dPMC und vPMC, der SMA, der S1 und der IFG. Da die Metaanalyse von Caspers und Kollegen (2010) keine Informationen über das Cerebellum beinhaltet, wählten wir die Areale für die ROI-Analyse der cerebellären Daten aus, die in vorangegangenen Studien während der Beobachtung (beispielsweise Dimitrova et al., 2006; Schmahmann et al. 2009) sowie der Ausführung (beispielsweise Sokolov et al., 2010) von Bewegungen und auch in der ersten Studie der vorliegenden Arbeit aktiviert waren. Dies umfasste die Lobuli I-IV, V, VI, VII, und VIII, sowie Crus I und Crus II. Die methodischen Aspekte der verwendeten ROI-Analyse entsprachen denen der ersten Studie (siehe Kap. 2.3.6). Das Signifikanzniveau der ROI-Analysen betrug in dieser Studie $p < .05$ (FWE-korrigiert).

Um neben den Unterschieden zwischen der jeweiligen Expertise- und Novizensportart auch die Gemeinsamkeiten und damit auch den Transfer auf die nicht beherrschte Sportart zu untersuchen, wurde eine Conjunction-Analyse für alle 31 Probanden durchgeführt. Mit deren Hilfe konnten die Areale identifiziert werden, die in beiden Antizipationsbedingungen signifikant stärker aktiviert waren als in der jeweiligen Beobachtungsbedingung. Im Rahmen der Conjunction-Analyse wurden dafür die Voxel bestimmt, die sowohl für den Kontrast *Expertisesportart Antizipation > Expertisesportart Beobachtung* als auch für den Kontrast *Novizensportart Antizipation > Novizensportart Beobachtung* eine stärkere Aktivierung zeigten. Da bei dieser Conjunction-Analyse zwei Kontraste miteinander verglichen wurden, für die getrennt betrachtet mit starken Aktivierungen zu rechnen war, konnte davon ausgegangen werden, dass auch eventuelle Überlappungen zu starken Aktivierungen führen würden. Daher kam eine Ganzkopfanalyse zur Anwendung. Die Signifikanzschwelle dieser Conjunction-Analyse lag bei $p < .05$, unter Verwendung einer family-wise-error-Korrektur (FWE) auf den gesamten Cortex Cerebri beziehungsweise auf die im SUI-Template enthaltenen Voxel im Falle der gesonderten Cerebellum-Auswertung (für genauere Informationen siehe Kap. 2.3.6).

3.4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Studie Tennisexperten vs. Volleyballexperten vorgestellt werden. Zu Beginn werden daher die Verhaltensdaten präsentiert, gefolgt von den hirnhypophysologischen Ergebnissen. Ausgewertet wurden jeweils die Daten von 31 der 34 Versuchsteilnehmer, da drei Versuchsteilnehmer aufgrund von zu starken Kopfbewegungen von der Analyse ausgeschlossen werden mussten. Bei diesen drei Versuchspersonen waren jeweils über 10 % der 814 Volumina als Ausreißer identifiziert worden (für genauere Informationen siehe Kap. 2.3.6).

3.4.1 Behaviorale Daten

In einem ersten Schritt wurde die Antizipationsleistung der beiden Gruppen für die *Tennis Antizipationsbedingung* betrachtet. Die Tennisexperten gaben im Mittel bei 65.42 % ($SD = 10.12$) der Tennisaufschläge eine korrekte Antwort, die Volleyballexperten hingegen bei 61.14 % ($SD = 8.46$). Für die Anzahl an korrekten Antworten für die *Volleyball Antizipationsbedingung* lagen die Volleyballexperten durchschnittlich bei 74.19 % ($SD = 7.76$), die Tennisexperten bei 68.54 % ($SD = 8.05$) (siehe Abb. 13). In beiden Gruppen lag die Leistung sowohl in der *Tennis*, als auch in der *Volleyball Antizipationsbedingung* signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 % ($t_{Tennis\ Tennisexperten} (14) = 5.90, p < .001, d = 1.52$; $t_{Tennis\ Volleyballexperten} (15) = 5.26, p < .001, d = 2.30$; $t_{Volleyball\ Volleyballexperten} (15) = 12.55, p > .001, d = 3.15$; $t_{Volleyball\ Tennisexperten} (14) = 8.92, p = .002, d = 1.32$). Um den Einfluss der Expertise der Probanden und der unterschiedlichen Antwortbedingungen auf die Anzahl der korrekten Antworten zu untersuchen, wurde eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Expertise (Tennisexperte, Volleyballexperte) und Antizipationsbedingung (*Tennis Antizipation*, *Volleyball Antizipation*) mit Messwiederholung auf dem Faktor Antizipationsbedingung gerechnet. Diese ergab einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Antizipationsbedingung ($F(1,29) = 14.76, p < .001, \eta^2 = .337$), sowie eine signifikante Interaktion zwischen beiden Faktoren $F(1,29) = 5.66, p = .024, \eta^2 = .163$). Der signifikante Haupteffekt des Faktors Antizipationsbedingung beruht auf den im Vergleich zur Vorhersage der Tennisaufschläge besseren Antizipationsleistungen bei der Vorhersage der Volleyballaufschläge und deutet somit darauf hin, dass die Aufgabenschwierigkeit der *Tennis Antizipationsbedingung* höher war. Der signifikante Interaktionseffekt resultiert daraus, dass in beiden Antizipationsbedingungen die jeweilige Expertengruppe eine bessere Antizipationsleistung zeigt als die mit der Sportart

nicht vertraute Gruppe. Der Faktor Expertise zeigte keinen signifikanten Haupteffekt ($F(1,29) < 1$, n.s.).

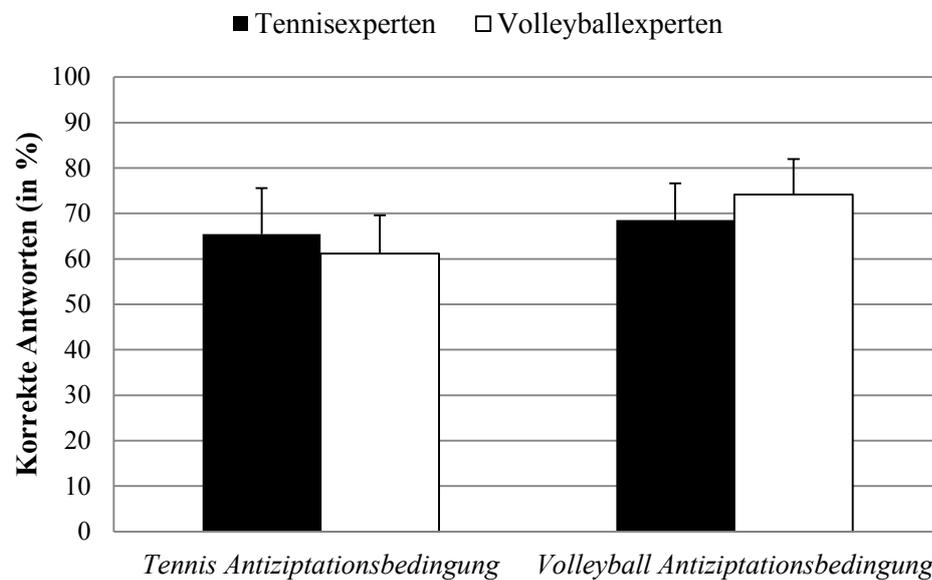


Abb. 13 Mittelwerte der korrekten Antworten in Prozent von allen 31 Probanden für die beiden Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertisesportart (Tennisexperten, Volleyballexperten) sowie nach Antizipationsbedingung (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Volleyball Antizipationsbedingung*).

Die gleiche 2×2 faktorielle Varianzanalyse wurde auch für die Antwortzeiten der *Tennis*- und der *Volleyball Antizipationsbedingung* durchgeführt. Definiert war die Antwortzeit in der vorliegenden Studie dabei als der Zeitraum zwischen dem Ball-Schläger- beziehungsweise Ball-Hand-Kontakt und dem Tastendruck der Versuchsperson. Bei den Tennisaufschlägen betrugen die durchschnittlichen Antwortzeiten 513 ms ($SD = 211$) bei den Tennisexperten und 641 ms ($SD = 146$) bei den Volleyballexperten. Für die Antizipation der Volleyballaufschläge benötigten die Volleyballexperten im Durchschnitt 608 ms ($SD = 148$), die Tennisexperten 577 ms ($SD = 174$) (siehe Abb. 14). Es zeigte sich ein signifikanter Interaktionseffekt der Faktoren Expertise und Antizipationsbedingung ($F(1,29) = 9.56$, $p = .004$, $\eta^2 = .248$). Signifikante Haupteffekte der Faktoren Expertise ($F(1,29) = 1.80$, $p = .190$, $\eta^2 = .058$) und Antizipationsbedingung ($F(1,29) < 1$, n.s.) konnten nicht gezeigt werden.

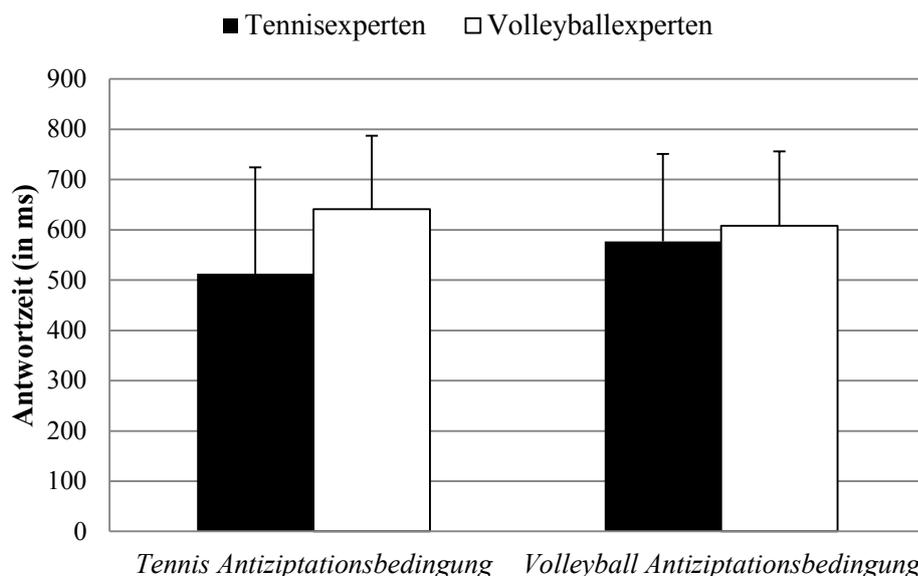


Abb. 14 Antwortzeiten in Millisekunden von allen 31 Probanden für die beiden Antizipationsbedingungen, getrennt nach Expertisesportart (Tennisexperten, Volleyballexperten) sowie nach Antizipationsbedingung (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Volleyball Antizipationsbedingung*).

In der *Tennis* und der *Volleyball Beobachtungsbedingung* hatten die Probanden jeweils die Aufgabe, die Spieler beim Ballprellen zu beobachten und anschließend die Taste zu drücken, die Ihnen in der zuvor dargebotenen Instruktion vorgegeben wurde. Da die Anzahl korrekter Antworten der Expertengruppen in beiden Beobachtungsbedingungen bei jeweils 99 % lag, ist davon auszugehen, dass die Aufmerksamkeit auch in diesen Beobachtungsbedingungen konstant hoch war.

3.4.2 Hirnphysiologische Daten

Die vorliegende zweite Studie nutzt die funktionelle Magnetresonanztomographie, um den Einfluss von Expertise auf die Gehirnaktivierung während der Antizipation von Handlungseffekten zu untersuchen. Zu Beginn sollte die Aktivierung während der Antizipation von Handlungseffekten unabhängig von der Expertise der Versuchsteilnehmer ermittelt werden. Dieser Kontrast wurde als Ganzkopfanalyse ausgeführt, die Ergebnisse beinhalten daher alle Aktivierungen, deren p -Werte FWE-korrigiert (Family-Wise-Error) unterhalb der Signifikanzschwelle von $p = .05$ liegen. Vor allem aber sollte im zweiten Experiment durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Expertisegruppen der Einfluss von spezifischer Expertise auf die Aktivierung des AON während der Vorhersage von Handlungseffekten untersucht werden. Auf Basis der Ergebnisse der zuvor durchgeführten Studie zum Vergleich von Tennis-

perten und Novizen erwarteten wir eine stärkere Aktivierung von Arealen des AON, wenn die Versuchsteilnehmer die Effekte von Handlungen antizipieren sollten, für die sie eine ausgeprägte Expertise besaßen. Bei allen Vergleichen zwischen der Experten- und der Novizenbedingung wurden ROI-Analysen durchgeführt, für die die Signifikanzschwelle bei $p = .05$ (FWE-korrigiert) lag. Gleiches gilt für die parametrischen Auswertungen, bei denen die Aktivierung des AON in Abhängigkeit von der Antizipationsleistung betrachtet wurde. Abschließend wurde eine Conjunction-Analyse durchgeführt, um die Areale zu identifizieren, die während der Antizipation in der beherrschten und der nicht beherrschten Sportarten gleichermaßen aktiviert waren (Ganzkopfanalyse, FWE-korrigiert, $p < .05$).

Expertiseunabhängige Aktivierung von Arealen des AON während der Effektantizipation

Es wurde gezeigt, dass Areale des AON genutzt werden, um die Effekte von beobachteten Handlungen antizipieren (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013, Bishop et al., 2013; Wright & Jackson, 2007). Und auch bei der zuvor von uns durchgeführten Studie resultierte die Antizipation der Effekte beobachteter Tennisschläge unabhängig von der Expertise der Probanden in einer signifikanten Aktivierung unter anderem des dPMC, des IFG, des SPL sowie des Cerebellums. In der vorliegenden Studie erwarteten wir diese Ergebnisse bei dem Vergleich der Antizipations- mit den Beobachtungsbedingungen zu replizieren und damit weitere Unterstützung für die Theorie einer bedeutenden Funktion der Areale des AON bei der Effektantizipation zu liefern. Die Ganzkopfanalyse des dafür konzipierten Kontrasts (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) resultierte in einer signifikanten Aktivierung des SPL, des IPL, des IFG, des dPMC, des SMA, des MTG, des visuellen Kortex V5, des fusiformen Gyrus, der Insula, des Putamens, des anterioren und mittleren cingulären Kortex (ACC und MCC), des mittleren orbitalen Gyrus (MOG) und des Thalamus sowie von Crus II, Lobulus VI und Lobulus IX des Cerebellums ($p < .05$, FWE-korrigiert). Die Einteilung des PMC (BA 6) in einen dorsalen und einen ventralen Teil erfolgte dabei auf Höhe $z = 50$, basierend auf der Empfehlung von Rizzolatti et al. (2002). Eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tab. 8 sowie Abb. 15 zu finden.

Tab. 8 Ergebnisse der Ganzkopfanalyse des Kontrasts (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) für alle 31 Probanden.

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
SPL (7A)	R	15	-58	56	13.79	
SPL (7PC)	R	24	-52	53	11.93	
SPL (7A)	L	-18	-58	56	11.74	
IFG (pars opercularis)	R	45	8	26	10.22	
IFG (pars orbitalis)**	R	51	47	-13	5.88	
dPMC	R	-30	-4	59	9.75	
SMA**	L	-6	20	44	9.35	
IPL (PF)	R	60	-37	23	6.33	
Cerebellum, Lobulus IX*	L	-12	-56	-47	8.50	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-10	-72	-21	7.84	✓
Cerebellum, Lobulus VI	R	40	-60	-27	6.41	✓
Cerebellum, Lobulus IX*	R	14	-56	-45	6.06	✓
Cerebellum, Crus II	L	-36	-64	-47	4.84	✓
MTG**	L	-45	-67	8	17.60	
V5	R	51	-67	2	15.13	
Insula	L	-30	20	1	10.02	
MCC**	L	-9	26	32	9.25	
Putamen**	L	-9	8	-7	8.27	
Fusiformer Gyrus**	R	45	-40	-16	7.91	
MOG**	R	30	38	-22	6.68	
ACC**	L	0	5	29	6.50	
Thalamus**	L	-12	-22	14	5.91	

* Probabilistisches Labeling unter 20 %. ** Anatomisches Labeling. MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert. Für Abkürzungen, siehe Text.

Um die Bedeutung der Areale des AON für die Effekttantizipation auch unabhängig von der Expertise weitergehend zu untersuchen, wurde die Antizipationsleistung der Probanden für den Vergleich der Aufschlagantizipation mit der Beobachtung des Ballprellens als zusätzlicher Parameter eingeführt. Dazu wurde die Leistung jedes Probanden in der *Tennis* und der

Volleyball Antizipationsbedingung gemittelt. Die Werte zwischen 55 % und 80 % ($M = 67.39\%$, $SD = 6.17$) gingen dann als Parameter „Antizipationsleistung“ in den Kontrast (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) mit ein, der für alle 31 Probanden gerechnet wurde. Die parametrische ROI-Analyse ergab, dass eine bessere Antizipationsleistung mit einer stärkeren Aktivierung des SPL sowie Crus I und Lobulus VIIIa des Cerebellums assoziiert war (siehe Tab. 9). Diese leistungsabhängige Aktivitätssteigerung zeigte sich nicht in Arealen außerhalb des AON (mittlerer frontaler Gyrus, frontales Operculum und frontaler Pol), die zur Kontrolle ebenfalls in diese Auswertung miteinbezogen wurden.

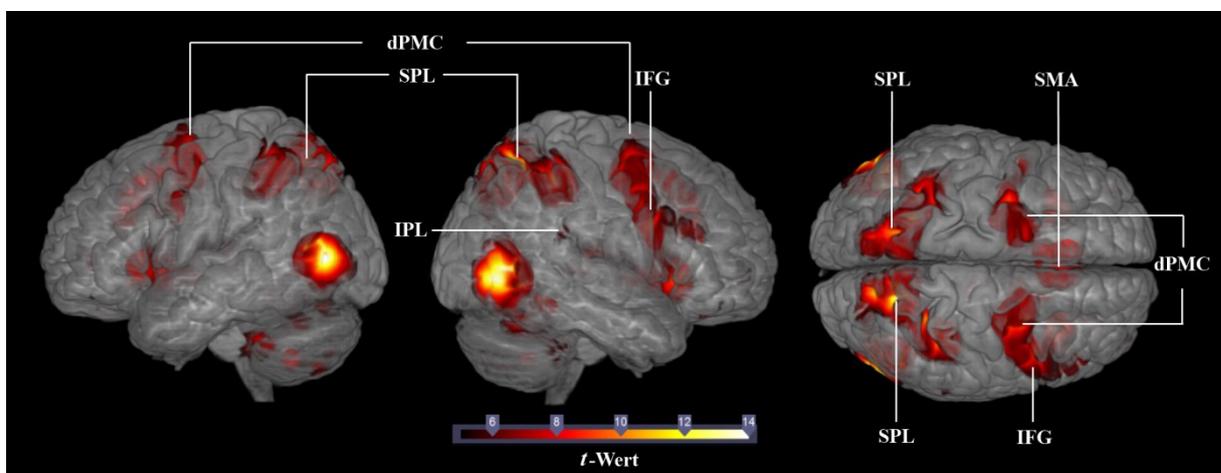


Abb. 15 Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5 und 14).

Tab. 9 Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung“ auf den Kontrast (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) für alle 32 Probanden (ROI-Analyse).

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t -Wert	SUIT
SPL (5Ci)	L	-15	-34	44	2.87	
SPL (7P)	R	27	-46	50	2.84	
Cerebellum, Lobulus VIIIa	R	32	-54	-49	3.28	✓
Cerebellum, Crus I	L	-4	-78	-27	2.08	✓

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

Expertiseabhängige Aktivierung von Arealen des AON während der Effektantizipation

Nachdem der Vergleich zwischen den Tennisexperten und den Novizen in der zuvor durchgeführten Studie zu einer stärkeren Aktivierung von diversen Arealen des AON und insbesondere des Cerebellums während der Effektantizipation geführt hatte, hatten wir für den vorliegenden Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Expertisegruppen die Hypothese, dass die Effektantizipation von Handlungen, für die die Probanden eine hohe Expertise besitzen, zu einer stärkeren Aktivierung des AON führen sollte. Um diese erwarteten Aktivierungsunterschiede zu identifizieren wurde die Antizipation der Aufschlagrichtung in der jeweiligen Expertisesportart mit der Antizipation in der Sportart verglichen, in der die Probanden Novizen waren. Die Antizipationsbedingung wurde zuvor jedoch noch mit der Beobachtungsbedingung der jeweiligen Sportart kontrastiert. Daraus resultierte der Within-Subject-Kontrast (*Antizipationsbedingung Expertisesportart > Beobachtungsbedingung Expertisesportart*) > (*Antizipationsbedingung Novizensportart > Beobachtungsbedingung Novizensportart*) für alle 31 Versuchsteilnehmer. Da die gezeigten Videos der beiden Beobachtungsbedingungen in Bezug auf die visuelle Stimulation mit den Aufschlagvideos der jeweiligen Sportart vergleichbar waren (gleiche Spieler, Interaktion der Spieler mit Schläger und Tennisball beziehungsweise Hand und Volleyball, identische Hallen und Bildausschnitt) und auch die Beobachtung der Spieler beim Ballprellen eine Beobachtung menschlicher Bewegungen darstellte, waren Aktivierungsunterschiede bei dem Kontrast der Antizipations- mit den Beobachtungsbedingungen nicht auf die reine Bewegungsbeobachtung oder Unterschiede in der visuellen Stimulation zurückzuführen, sondern insbesondere auf den Prozess der Antizipation. Die ROI-Analyse ergab eine signifikant stärkere Aktivierung des SPL und des prä-SMA sowie Crus I, Crus II, Lobulus I-IV, Lobulus V, Lobulus VI, Lobulus VIIb, Lobulus VIIa und Lobulus VIIIb des Cerebellums während der Antizipation in der jeweiligen Expertisesportart der Versuchsteilnehmer ($p < .05$, FWE-korrigiert) (siehe Abb. 16). Der entgegengesetzte Kontrast ergab keine signifikante Aktivierung während der Antizipation in der Novizensportart im Vergleich zur Antizipation in der jeweiligen Expertisesportart. Die Ergebnisse dieser beiden Kontraste sind in Tab. 10 dargestellt.

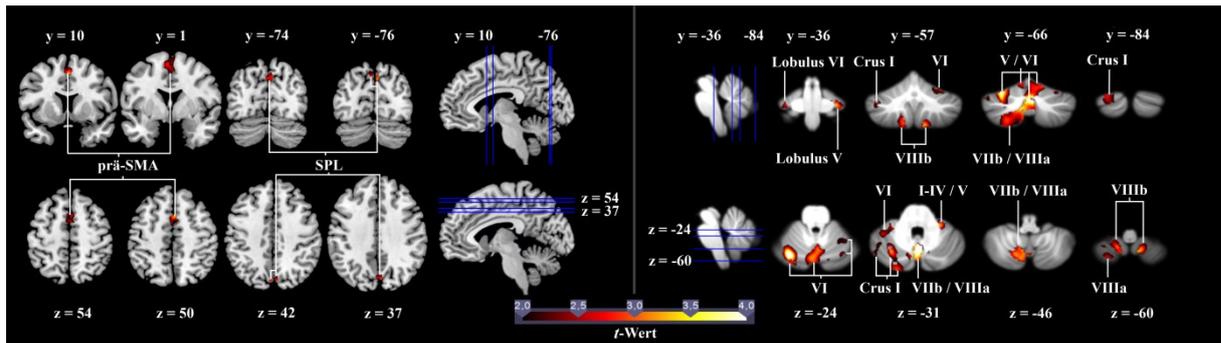


Abb. 16 Darstellung der signifikanten Aktivierung des Kontrasts (*Antizipationsbedingung Expertisesportart > Beobachtungsbedingung Expertisesportart*) > (*Antizipationsbedingung Novizensportart > Beobachtungsbedingung Novizensportart*) für alle 31 Probanden (ROI-Analyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 2 und 4).

Tab. 10 Ergebnisse der ROI-Analyse des Kontrasts (*Antizipationsbedingung Expertisesportart > Beobachtungsbedingung Expertisesportart*) > (*Antizipationsbedingung Novizensportart > Beobachtungsbedingung Novizensportart*) für alle 31 Probanden.

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t -Wert	SUIT
Expertisesportart > Novizensportart						
prä-SMA	R	3	11	50	3.60	
prä-SMA	L	-3	-1	62	3.33	
SPL (7PC)	L	-3	-79	41	3.55	
SPL (7M)	R	6	-76	38	3.22	
SPL (7M)	L/R	0	-73	32	3.18	
Cerebellum, Crus I	L	-30	-72	-25	4.44	✓
Cerebellum, Crus I	L	-4	-78	-27	3.13	✓
Cerebellum, Crus II	L/R	0	-72	-31	4.00	✓
Cerebellum, Lobulus I-IV	R	26	-34	-35	3.34	✓
Cerebellum, Lobulus V	R	28	-38	-33	3.51	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-30	-70	-21	5.28	✓
Cerebellum, Lobulus VI	R	2	-62	-29	4.43	✓
Cerebellum, Lobulus VI	R	10	-70	-13	3.67	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	L	-14	-68	-43	3.51	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	R	4	-66	-31	4.30	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIa	L	-8	-66	-39	3.60	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIa	R	4	-62	-31	4.54	✓

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
Cerebellum, Lobulus VIIIb	L	-8	-64	-41	3.72	✓
Cerebellum, Lobulus VIIIb	R	12	-58	-61	3.40	✓
Novizensportart > Expertisesportart						
-	-	-	-	-	-	

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

Mit dem Ziel den Einfluss der Expertise weitergehend zu untersuchen, wurde für alle 31 Versuchsteilnehmer ein Parameter „Antizipationsleistung Expertisesportart“ für den Kontrast *Antizipationsbedingung Expertisesportart > Beobachtungsbedingung Expertisesportart* eingeführt. Der Wertebereich des Parameters lag für alle 31 Experten zwischen 56 % und 91 % ($M = 70.06\%$, $SD = 9.94$). Die durchgeführte parametrische ROI-Analyse ergab eine signifikant stärkere Aktivierung des SPL für die Experten, die eine besonders gute Antizipationsleistung zeigten (für detailliertere Ergebnisse siehe Tab. 11). In einer parametrischen Auswertung wurde außerdem das Trainingsalter der Experten als Parameter für den Kontrast *Expertisesportart Antizipation > Expertisesportart Beobachtungsbedingung* eingeführt. Das Trainingsalter der Tennis- und der Volleyballexperten hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Aktivierung der Areale des AON während der Antizipation der Aufschläge in der jeweiligen Expertisesportart.

Tab. 11 Der Einfluss des Parameters „Antizipationsleistung Expertisesportart“ auf den Kontrast *Antizipationsbedingung Expertisesportart > Beobachtungsbedingung Expertisesportart* für alle 31 Experten (ROI-Analyse).

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
SPL (5Ci)	L	-15	-34	44	2.27	

MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert, Schwelle der ROI-Masken: 50 %. Für Abkürzungen, siehe Text.

Um neben den Unterschieden zwischen der jeweiligen Expertise- und Novizensportart auch die Gemeinsamkeiten und damit auch den Transfer auf die nicht beherrschte Sportart zu untersuchen, wurde eine Conjunction-Analyse für alle 31 Probanden durchgeführt, mit deren Hilfe die Areale identifiziert werden konnten, die in beiden Antizipationsbedingungen signifikant stärker aktiviert waren als in der jeweiligen Beobachtungsbedingung. Der Kontrast

(*Expertisesportart Antizipation > Expertisesportart Beobachtung*) \cap (*Novizensportart Antizipation > Novizensportart Beobachtung*) resultierte in einer signifikant stärkeren Aktivierung des SPL, des IPL, des vPMC, des dPMC, des visuellen Kortex V5, der Insula, des Nucleus Caudatus, des MOG, des inferioren und mittleren temporalen Gyrus sowie von Crus I, Lobulus VI, Lobulus VIIa und Lobulus IX des Cerebellums (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert). Eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tab. 12 sowie Abb. 17 zu finden

Tab. 12 Ergebnisse der Conjunction-Analyse des Kontrasts (*Expertisesportart Antizipation > Expertisesportart Beobachtung*) \cap (*Novizensportart Antizipation > Novizensportart Beobachtung*) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse).

Name des Areals	L/R	X	Y	Z	t-Wert	SUIT
SPL (7A)	L	-27	-52	56	19.74	
SPL (5Ci)	L	-15	-25	41	5.93	
vPMC	L	-27	-4	47	18.89	
dPMC	R	27	-7	56	18.65	
IPL (PF)	R	66	-34	26	8.96	
IPL (PFcm)	L	-51	-40	26	5.89	
Cerebellum, Lobulus VI	R	38	-62	-25	11.18	✓
Cerebellum, Lobulus VI	L	-10	-74	-21	10.80	✓
Cerebellum, Crus I	L	-32	-66	-29	6.97	✓
Cerebellum, Lobulus VIIa	L	-30	-61	-52	6.22	✓
Cerebellum, Lobulus IX	L	-12	-54	-47	6.16	✓
V5	R	51	-64	5	19.49	
Insula**	R	36	23	-4	17.48	
Insula**	L	-33	20	1	13.67	
MOG**	L	-51	-76	5	15.98	
Nucleus Caudatus**	L	-12	14	1	13.09	
ITG**	L	-42	-43	-16	7.99	
MOG**	R	27	38	-22	7.82	

* Probabilistisches Labeling unter 20 %. ** Anatomisches Labeling. MNI Koordinaten, $p < .05$, FWE-korrigiert. Für Abkürzungen, siehe Text.

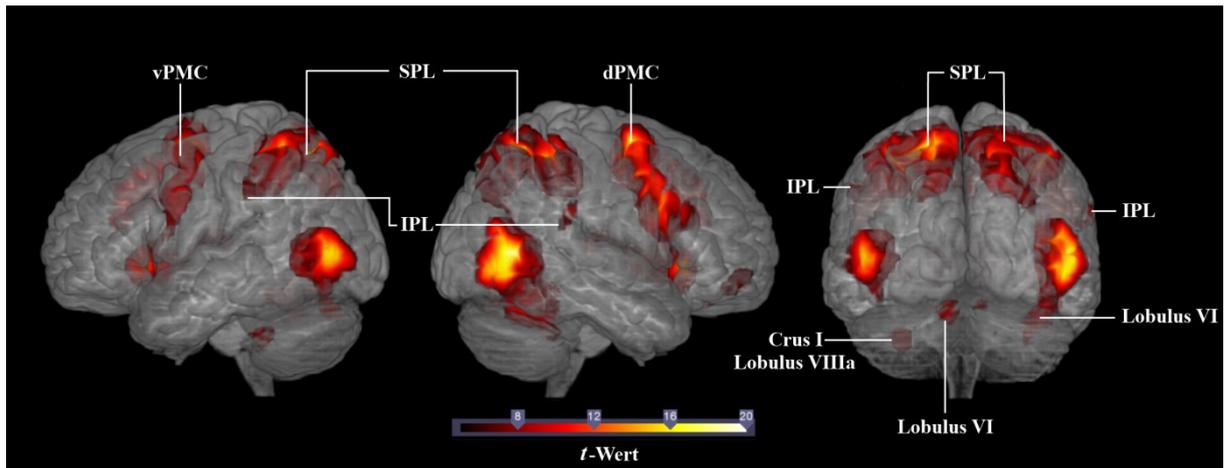


Abb. 17 Darstellung der signifikanten Aktivierung der Conjunction-Analyse des Kontrasts (*Expertisesportart Antizipation* > *Expertisesportart Beobachtung*) \cap (*Novizensportart Antizipation* > *Novizensportart Beobachtung*) für alle 31 Probanden (Ganzkopfanalyse, $p < .05$, FWE-korrigiert, dargestellte t -Werte zwischen 5 und 20).

3.5 Diskussion

Experiment 2 wurde durchgeführt, um die Beteiligung des AON und insbesondere des Cerebellums an der Vorhersage von Handlungseffekten in einem modifizierten Expertisevergleich zu untersuchen und neue Erkenntnisse bezüglich der Theorie einer Nutzung interner Modelle zur Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen zu gewinnen. Das zweite Experiment sollte der Frage nachgehen, ob Experten einer Sportart auch bei der Antizipation in anderen Sportarten von ihren erworbenen motorischen Repräsentationen profitieren und sie ihre Antizipationsfähigkeiten somit auch auf andere Situationen transferieren können. Nachdem in Experiment 1 bereits Hinweise auf eine leistungsabhängige Aktivierung des AON während der Effektantizipation gefunden wurden, sollte in Experiment 2 neben dem Einfluss der motorischen Expertise auf die Aktivierung von Arealen des AON auch der Einfluss der Antizipationsleistung untersucht werden. An der Studie nahmen Tennis- und Volleyballexperten teil, die alle die Aufgabe hatten die Richtung von Aufschlägen aus beiden Sportarten vorherzusagen. Das Design von Experiment 2 unterscheidet sich damit entscheidend von Experiment 1 sowie weiteren Studien, die zuvor den Unterschied zwischen Experten und Novizen untersucht hatten. In diesen wurde die Effektantizipation von Experten in einer spezifischen Sportart mit Novizen kontrastiert, die weder in der untersuchten Disziplin noch in einer anderen Domäne Expertise aufwiesen. In der vorliegenden Studie wurden hingegen zwei Experten-gruppen verglichen, die beide spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besaßen, aber gleichzeitig keine Vorerfahrungen in der jeweils anderen Sportart vorweisen konnten. Da beiden Gruppen auch die Stimuli der nicht beherrschten Sportart präsentiert wur-

den, bildeten die Experten somit auch die Novizengruppe in der jeweils anderen Bedingung. Demnach ist es durch die zwei unterschiedlichen Expertisegruppen möglich den Einfluss von sportartspezifischer Expertise zu untersuchen.

Die Analyse der Verhaltensdaten zeigte in beiden Sportarten eine bessere Antizipationsleistung der jeweiligen Expertengruppe. In Bezug auf die hirnhysiologischen Daten resultierte die Betrachtung der Antizipation der Aufschläge unabhängig von der Expertise der Probanden im Vergleich zur reinen Bewegungsbeobachtung in einer stärkeren Aktivierung des SPL, des IPL, des IPS, des S1, des IFG, des PMC, des SMA sowie des Cerebellums. Wurde die Antizipationsleistung in beiden Sportarten als Parameter in diesen Vergleich eingefügt, zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl an korrekten Antworten und der Aktivierung des SPL sowie Lobulus VIIa und Crus I des Cerebellums. Der Vergleich der Antizipation in der beherrschten Sportart mit der Antizipation in der nicht beherrschten Sportart führte zu einer stärkeren Aktivierung des SPL, des SMA sowie in diversen Arealen des Cerebellums. Um zu untersuchen, ob Experten ihr erworbenes Antizipationsnetzwerk auch in Sportarten anwenden, für die sie keine Expertise besitzen, wurde in einer Conjunction-Analyse die gemeinsame Aktivierung der Antizipation in der beherrschten Sportart und der Antizipation in der nicht beherrschten Sportart bestimmt. Die Conjunction-Analyse resultierte unter anderem in einer Aktivierung des SPL, des IPL und des PMC sowie von Lobulus VI und Crus I des Cerebellums. In den folgenden Abschnitten sollen diese Ergebnisse diskutiert werden.

3.5.1 Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Effekttantizipation unabhängig von der Expertise der Probanden

In einem ersten Schritt sollten die Areale identifiziert werden, die unabhängig von der Expertise der Probanden während der Vorhersage von Handlungseffekten eine stärkere Aktivierung aufweisen als bei der reinen Bewegungsbeobachtung. Es wurde erwartet, dass die Ergebnisse von Experiment 1 repliziert werden können und sich eine signifikant stärkere Aktivierung in Arealen des AON zeigt. Durch den Vergleich mit der Kontrollbedingung des Ballprellens wurden auch in Experiment 2 die neuronalen Prozesse der Effekttantizipation isoliert, da Aspekte der visuellen Stimulation, wie zum Beispiel der Bildausschnitt und der Hintergrund, identisch waren und die Modelle auch in der Kontrollbedingung mit dem Ball und in der Tennisbedingung auch mit dem Schläger interagierten. Dazu wurde die Antizipation der Aufschläge in beiden Sportarten mit der Beobachtung des Ballprellens in beiden Sportarten kontrastiert. Dieser Kontrast resultierte in einer stärkeren Aktivierung des SPL, des IPL, des IFG,

des dPMC, des SMA sowie des Cerebellums und somit in einer Vielzahl von Arealen des AON (Caspers et al., 2010). Die Ergebnisse fügen sich damit in die bereits vorhandenen Ergebnisse zur Beteiligung von Arealen des AON an der Effektantizipation beobachteter Handlungen ein (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013; Bishop et al., 2013; Diersch et al., 2013; Gazzola & Keysers, 2009; Stadler et al., 2012; Urgesi et al., 2010; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011; Zentgraf et al., 2011) und bestätigen darüber hinaus die Interpretation der Ergebnisse aus Experiment 1. Experiment 2 hat gezeigt, dass die Vorhersage der Handlungseffekte im Sport im Vergleich zu einer reinen Bewegungsbeobachtung insbesondere mit einer stärkeren Aktivierung in motorik-assoziierten Arealen assoziiert ist und bekräftigt somit die Annahme, dass eine Simulation der beobachteten Bewegung in Arealen des AON stattfindet (Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Avenanti et al., 2013; Blakemore & Decety, 2001; Blakemore & Frith, 2005; Calvo-Merino et al., 2006; Caspers et al., 2010; Cross et al., 2009; Gazzola & Keysers, 2009; Iacoboni et al., 2005; Kilner et al., 2004; Miall, 2003; Oztop et al., 2005; Prinz, 2006; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Shmuelof & Zohary, 2007; Stadler et al., 2011; Wolfensteller, 2009; Zentgraf et al., 2009).

Die Bedeutung des AON für die Vorhersage von Handlungseffekten wird auch von den Ergebnissen der parametrischen Auswertung dieses Kontrasts hervorgehoben. Wie erwartet korrelierte eine bessere Leistung bei der Antizipation der Aufschläge (Mittelwert der beherrschten und der nicht beherrschten Sportart) mit einer stärkeren Aktivierung des SPL sowie von Crus I und Lobulus VIIIa des Cerebellums. Gleichzeitig ging eine höhere Anzahl an korrekten Antworten jedoch nicht mit einer stärkeren Aktivierung in Arealen außerhalb des AON (mittlerer frontaler Gyrus, frontales Operculum, frontaler Pol) einher. Die Aktivierung von SPL und Lobulus VIIIa repliziert somit die Ergebnisse der Post-hoc-Analyse von Experiment 1, in der bereits gezeigt werden konnte, dass die Stärke der Aktivierung in diesen Arealen unabhängig von der Expertise des Beobachters von der Antizipationsleistung abhängig ist. Zusammen mit den Resultaten der ersten Studie sind diese Ergebnisse demnach ein Hinweis darauf, dass insbesondere parietale und cerebelläre Areale für die Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen von großer Bedeutung sind.

3.5.2 Vergleich der Antizipationsleistung zwischen beiden Expertisegruppen

Die Analyse der Verhaltensdaten ergab, dass sowohl die Tennisexperten als auch die Volleyballexperten in der Lage waren, die Richtung von Aufschlägen in ihrer eigenen und auch in der von ihnen nicht beherrschten Sportart anhand der verfügbaren kinematischen Informatio-

nen vorherzusagen. So zeigten beide Gruppen bei der Vorhersage der Tennis- und der Volleyballaufschläge eine Antizipationsleistung, die signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit von 50 % lag. In beiden Sportarten gaben die jeweiligen Experten eine höhere Anzahl an korrekten Antworten. Dies resultierte in einer Varianzanalyse mit den Faktoren Expertise (Tennisexperte, Volleyballexperte) und Antizipationsbedingung (*Tennis Antizipationsbedingung*, *Volleyball Antizipationsbedingung*), mit dem zweiten Faktor als Messwiederholung, in einem signifikanten Interaktionseffekt. Der Interaktionseffekt wurde aufgrund der zahlreichen Studien zum Unterschied zwischen Experten und Novizen bei der Antizipation von Handlungseffekten erwartet und bestätigt die Theorie, dass Experten in Sportarten, in denen der Effekt einer Handlung unter Zeitdruck vorhergesagt werden muss, von ihren Vorerfahrungen profitieren und die Vorhersage von Handlungseffekten in solchen Sportarten ein wichtiger Bestandteil der Expertise ist (für einen Überblick siehe Williams et al., 2011). Bei der vorliegenden Studie ist hervorzuheben, dass zwei Expertengruppen verglichen wurden, die beide spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besaßen, aber gleichzeitig keine Vorerfahrungen in der jeweils anderen Sportart vorweisen konnten. Da beide Gruppen auch die Aufschläge der nicht beherrschten Sportart vorherzusagen mussten, bildeten die Experten somit auch die Novizengruppe in der jeweils anderen Bedingung. In vorangegangenen Untersuchungen hatten sich die Novizengruppen aus Probanden zusammengesetzt, die weder in der untersuchten Disziplin noch in einer anderen Domäne Expertise aufwiesen. Aufgrund der nicht verfügbaren Ballfluginformationen sprechen die Ergebnisse der vorliegenden Studie dafür, dass Experten bei der Effektvorhersage insbesondere kinematischen Informationen der beobachteten Bewegungen nutzen können (siehe zum Beispiel Abernethy & Russell, 1987; Schorer et al., 2013; Williams et al., 2009). Weiterhin ergab die Varianzanalyse einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Antizipationsbedingung. Demnach zeigten beide Expertengruppen bei der Vorhersage der Aufschlagrichtung im Volleyball eine signifikant bessere Leistung als bei der Vorhersage der Tennisaufschläge. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich die Tennis- und die Volleyballaufschläge hinsichtlich ihrer Aufgabenschwierigkeit unterscheiden.

Eine weitere Varianzanalyse der Antwortzeiten, ebenfalls mit den Faktoren Expertise und Antizipationsbedingung, ergab einen signifikanten Interaktionseffekt. Beide Expertisegruppen gaben in der von ihnen beherrschten Sportart schnellere Antworten als in der von ihnen nicht beherrschten Sportart. Ein solches Ergebnis konnte bereits von Williams und Kollegen (2002) in einer Untersuchung mit Tennisexperten und Novizen gezeigt werden und liefert einen

weiteren Hinweis darauf, dass Experten bei der Vorhersage von Handlungseffekten in ihrer eigenen Sportart von ihren spezifischen Vorerfahrungen profitierten. Bei der vergleichenden Betrachtung der Antwortzeiten in beiden Expertengruppen wird die Tendenz deutlich, dass die Tennisexperten sowohl bei der Vorhersage der Tennisaufschläge als auch bei der Vorhersage der Volleyballaufschläge kürzere Antwortzeiten aufweisen als die Volleyballexperten, wobei der Haupteffekt Expertise das Signifikanzniveau verfehlte. Der Grund für die Tendenz der Tennisexperten, schneller auf die beobachteten Handlungen zu reagieren, könnte in den höheren Aufschlaggeschwindigkeiten im Tennis liegen. Diese erfordern von Tennisspielern eine sehr frühe Reaktion, da sonst nicht mehr genügend Zeit vorhanden ist, um die eigene Reaktion vorzubereiten. Es ist denkbar, dass die Tennisexperten diese Strategie auch bei der Vorhersage der Volleyballaufschläge angewendet haben.

3.5.3 Expertiseabhängige Aktivierung von Arealen des Action Observation Networks während der Effektantizipation

Der Vergleich der neuronalen Aktivität während der Vorhersage von Vorhandschlägen im Tennis zwischen Tennisexperten und Novizen hatte in Experiment 1 zu einer signifikant stärkeren Aktivierung in prämotorischen und parietalen sowie cerebellären Arealen geführt. Daher wurde für den Vergleich der Gehirnaktivierung während der Antizipation der Aufschlagrichtung in der jeweiligen Expertisesportart mit der Vorhersage in der nicht beherrschten Sportart in Experiment 2 eine stärkere Aktivierung in Arealen des AON erwartet. Gemäß den Ergebnissen von Experiment 1 sollte sich der Expertiseunterschied dabei insbesondere in Arealen des Cerebellums zeigen. Im Vergleich zu Experiment 1 und vielen vorangegangenen Expertiseuntersuchungen stellt das Design von Experiment 2 einen deutlich konservativeren Ansatz zur Ermittlung von Expertiseunterschieden dar, denn die Novizengruppen setzten sich nicht aus komplett unerfahrenen Versuchspersonen zusammen, sondern bestanden aus den Experten der jeweils anderen Disziplin, die spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besaßen.

Der Vergleich zwischen der Antizipation in der von den Probanden beherrschten Sportart und der Antizipation in der von den Probanden nicht beherrschten Sportart resultierte in einer stärkeren Aktivierung des SMA und des SPL sowie Crus I, Crus II, Lobulus I-IV, Lobulus V, Lobulus VI, Lobulus VIIb und Lobulus VIIIa und VIIIb des Cerebellums. Dabei ist zu beachten, dass die Antizipation in jeder Sportart zunächst mit der passenden Beobachtungsbedingung kontrastiert wurde, um im anschließenden Vergleich der Expertensportart mit der

Novizensportart die Unterschiede in den Prozessen der Effektantizipation zu isolieren. Dass Expertise in einer Sportart bei der Antizipation von Handlungseffekten zu einer stärkeren Aktivität in prämotorischen und parietalen Arealen des AON führt, konnte zuvor auch schon im Badminton (Wright et al., 2010, 2011), im Fußball (Bishop et al., 2013) sowie im Tennis in Experiment 1 gezeigt werden. Eine stärkere Aktivierung in motorik-assoziierten Arealen des Cerebellums der Experten konnte zuvor in Experiment 1 und in den Studien von Abreu et al. (2012) sowie Bishop et al. (2013) gefunden werden. Trotz des konservativeren Designs konnten auch diese Ergebnisse von Experiment 1 repliziert werden. Zusätzlich zur Aktivierung von Crus I und II sowie Lobulus VI, VII und VIII, die auch in Experiment 1 in der Expertengruppe signifikant stärker aktiviert waren, zeigte in Experiment 2 mit dem anterioren Cerebellum (Lobulus I-V) ein Teil des Cerebellums eine höhere Aktivierung bei der Antizipation in der beherrschten Sportart, der als besonders motorik-relevant beschrieben wird (für einen Überblick siehe Stoodley & Schmahmann, 2009). Sowohl am Kapuzineraffen (Kelly & Strick, 2003) als auch am Menschen (Grodd et al., 2001; Nitschke et al., 1996; Rijntjes et al., 1999; Thickbroom et al., 2003) konnte gezeigt werden, dass Arm- und Handbewegungen in Lobulus IV, V und VI repräsentiert sind. Donchin und Kollegen (2012) fanden beispielsweise heraus, dass Lobulus VI insbesondere bei der Ausführung von visuomotorischen Armbewegungen von großer Bedeutung ist, die eine Anpassung an einen visuellen Stimulus erfordern. Somit sind in Experiment 2 in der Expertisebedingung erneut Areale des Cerebellums stärker aktiviert, die Körperteile repräsentieren, die bei der Ausführung und insbesondere auch bei der Antizipation von Tennis- und Volleyballaufschlägen eine große Rolle spielen (Lee, 2010; Williams et al., 2009).

Zahlreiche Autoren gehen davon aus, dass das Cerebellum interne Modelle zur Kontrolle der Bewegungsausführung beinhaltet, die unter anderem der Vorhersage der zu erwartenden sensorischen Effekte bei der Handlungsausführung dienen (Blakemore & Sirigu, 2003; Kawato et al., 2003; Miall & Wolpert, 1996; Wolpert, 1997; Wolpert & Flanagan, 2001; Wolpert et al., 1998b). Insbesondere das Vorwärtsmodell wird jedoch nicht nur in Bezug auf die Vorhersage der Effekte eigener Bewegungen diskutiert, sondern auch hinsichtlich der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen (Blakemore & Decety, 2001; Gazzola & Keysers, 2009; Miall 2003; Oztog et al., 2005; Prinz, 2006; Schippers & Keysers, 2011; Shmuelof & Zohary, 2007; Wolpert et al., 2003; Wolpert & Flanagan, 2001; Yarrow et al., 2009). Eine Untersuchung von Cerminara und Kollegen (2009) an Katzen konnte zeigen, dass die Aktivität des Cerebellums während der Beobachtung eines bewegten Objekts durch die Vorhersage der im

weiteren Verlauf zu erwartenden Trajektorie zu erklären ist und nicht allein durch die visuelle Stimulation hervorgerufen wird. Die Autoren argumentieren, dass der internen Simulation der Objektbewegung während der Ausführung von Handlungen, in denen die relative Bewegung der Person zu einem Objekt relevant ist, eine entscheidende Funktion zukommt. Nach Ansicht von Yarrow und Kollegen (2009) könnte diese interne Simulation auf die Vorhersage des Effekts der gegnerischen Bewegung auf die Ballflugtrajektorie im Sport übertragbar sein. Athleten würden demnach ihre motorischen Repräsentationen auch zur Vorhersage der Effekte beobachteter Bewegungen anhand der internen Modelle nutzen.

Nach Miall (2003) findet die Effektvorhersage mithilfe der internen Modelle nicht allein in cerebellären Strukturen statt, sondern auch in posterior parietalen und prämotorischen Arealen. Außerdem konnten Studien zeigen, dass eine Verbindung zwischen diesen Arealen besteht (Blakemore & Sirigu, 2003; Clower et al., 2001). Zusammen mit den Ergebnissen aus Experiment 1 lies dies bei den Experten neben einer Aktivierung des Cerebellums auch eine stärkere Aktivierung des SPL erwarten. Diese Erwartung konnte in Experiment 2 bestätigt werden. Darüber hinaus war die Aktivierung des SPL, wie in Experiment 1, von der Leistung in der Expertisesportart abhängig. Die parametrische Analyse ermöglichte einen expliziten Test des Einflusses der Expertise auf die Aktivierung des AON während der Effektvorhersage, da die tatsächliche individuelle Antizipationsleistung berücksichtigt wurde. Es zeigte sich eine stärkere Aktivierung des SPL der Experten, wenn die Anzahl an korrekt antizipierten Aufschlägen in der von ihnen beherrschten Disziplin besonders hoch war. Die Ergebnisse liefern einen weiteren Hinweis auf die Verwendung eigener motorischer Repräsentationen zur Vorhersage der Effekte beobachteter Bewegungen anhand der internen Modelle. Wolpert et al. (1998a) konnten zeigen, dass der SPL die sensorischen und motorischen Informationen zur Vorhersage des Effekts einer geplanten Handlung mithilfe des Vorwärtsmodells integriert. Eine mögliche Funktion dieser Integration innerhalb des SPL könnte in der Verarbeitung von Kontextinformationen liegen (Imamizu & Kawato, 2008). Die Predictive-Coding Theorie (Kilner et al., 2007) und Ergebnisse der Expertiseforschung (Crognier & Féry, 2005; Farrow & Reid, 2012; McPherson & MacMahon, 2008; McRobert et al., 2011) legen nahe, dass die Vorhersage von Handlungseffekten auch auf den verfügbaren Kontextinformationen und den damit verbundenen Erwartungen der Probanden beruht. In der vorliegenden Studie könnte die Erwartung beispielsweise durch die eigene Einschätzung der im Experiment zuvor antizipierten Aufschläge beeinflusst worden sein.

Neben der Aktivierung in cerebellären und parietalen Strukturen konnte für den Vergleich der Experten- mit der Novizensportart auch eine höhere Aktivität in medial prämotorischen Strukturen gefunden werden. So führte die Antizipation der Aufschläge in der beherrschten Sportart im Vergleich zur nicht beherrschten Sportart zu einer signifikant stärkeren Aktivierung des prä-SMA. Dass der prä-SMA an der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen beteiligt ist, konnten auch Stadler und Kollegen (2011) zeigen. In einem Experiment, in dem die Probanden während einer fMRT-Messung die Folgeaktion von verschiedenen Alltagstätigkeiten vorhersagen mussten, resultierte die Vorhersage im Vergleich zu anderen Beobachtungsaufgaben, wie dem Wiedererkennen von Situationen, in einer stärkeren Aktivierung von prä-SMA und dPMC. Als Funktion des prä-SMA für die Vorhersage diskutieren die Autoren den Zugriff auf die eigenen motorischen Repräsentationen. Imamizu und Kollegen (2008) gehen davon aus, dass der SMA während der Vorhersage Informationen aus inversen Modellen verarbeitet, die insbesondere der Bestimmung der motorischen Befehle dienen, die zum Erreichen eines Handlungsziels erforderlich sind (Wolpert et al., 1998b). Diese Annahme ist kompatibel mit der Theorie von Stadler et al. (2011), dass der prä-SMA mit dem Zugriff auf die eigenen motorischen Repräsentationen assoziiert ist. Eine weitere mögliche Erklärung für die Funktion des prä-SMA bei der Effektvorhersage geben Gazzola und Keysers (2009). Die stärkere Aktivierung der Experten könnte darin begründet liegen, dass diese in der von ihnen beherrschten Sportart die Ausführung ihrer eigenen Antwort auf den antizipierten Effekt der beobachteten Antwort unterdrücken müssen, da sie durch jahreslanges Training gelernt haben frühzeitig eine angemessene Reaktion auf die beobachtete Handlung vorzubereiten und auszuführen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen die Ergebnisse von Experiment 1 sowie die Hypothese für Experiment 2, dass die Antizipation von Effekten beobachteter Handlungen in einer Sportart, für die die Probanden durch langjähriges Training stärker ausgeprägte interne Repräsentationen besitzen, mit einer stärkeren Aktivierung in Arealen des AON, insbesondere im Cerebellum, assoziiert ist. Da diese Ergebnisse aus dem Within-Subject-Vergleich der Expertise- mit der Novizensportart resultieren, scheint die Nutzung eigener motorischer Repräsentationen spezifisch für die eigene, beherrschte Sportart zu sein. Bei einer identischen Nutzung des erworbenen Vorhersagenetzwerks auch in der nicht beherrschten Sportart wäre für den Vergleich der Expertise- mit der Novizensportart innerhalb der Probanden kein signifikanter Unterschied zu erwarten gewesen. Ob es trotz der spezifischen Nutzung eigener

motorischen Repräsentationen in der Expertisesportart zu einem Transfer auf die Novizensportart, zumindest in Teilaspekten, kam, soll im folgenden Abschnitt erörtert werden.

3.5.4 Gemeinsamkeiten in der Aktivierung des Action Observation Networks in der Expertise- und der Novizensportart

Ein weiteres Ziel des zweiten Experiments war es die Frage zu adressieren, ob Experten bei der Antizipation in anderen Sportarten von ihren erworbenen motorischen Repräsentationen profitieren und ihre Antizipationsfähigkeiten somit auch auf andere Situationen transferieren können. In bisherigen Studien wurde weder systematisch untersucht, ob Experten auch in anderen Sportarten eine überdurchschnittliche Antizipationsleistung zeigen, noch wurde ermittelt, ob es bei Experten während der Effektantizipation in einer Sportart, für die sie keine Expertise besitzen, zu einer vergleichbaren Aktivierung in Arealen des AON kommt. Da Experten insbesondere kinematische Informationen der zu antizipierenden Bewegung nutzen und dabei auf eigene Repräsentationen der jeweiligen Handlung zurückgreifen, ist gemäß der Direct Matching Theorie aufgrund der sportartspezifischen Aufschlagbewegungen nicht zu erwarten, dass es bei der Antizipation zu Transfereffekten kommt (Rizzolatti & Craighero, 2004). Andererseits könnten Bewegungen auf verschiedenen Ebenen simuliert werden, wie dies die Predictive Coding Theorie von Kilner et al. (2007) diskutiert. Die höheren, abstrakteren Hierarchieebenen könnten auch für andere Sportarten genutzt werden und so zu Transfereffekten führen. Da für die fremde Sportart auf der Ebene der motorischen Repräsentationen keine exakten Informationen vorhanden sind, ist jedoch fraglich, ob sich der Transfer-effekt auch in den Verhaltensdaten zeigt.

Der Kontrast der Antizipation in der beherrschten mit der Antizipation in der nicht beherrschten Sportart resultierte in cerebellären und posterior parietalen Arealen in einer stärkeren Aktivierung des AON. Um neben den Unterschieden zwischen der jeweiligen Expertise- und Novizensportart auch die Gemeinsamkeiten und damit auch den Transfer auf die nicht beherrschte Sportart zu untersuchen, wurde eine Conjunction-Analyse durchgeführt. Mithilfe dieser Auswertung konnten die Areale identifiziert werden, die in beiden Antizipationsbedingungen signifikant stärker aktiviert waren als in der jeweiligen Beobachtungsbedingung. Dies war in der vorliegenden Studie unter anderem für den SPL, den IPL und den PMC sowie Lobulus VI und Crus I des Cerebellums der Fall. Eine der wenigen Studien, die die Frage nach dem Transfer eines Antizipationsnetzwerks zuvor in Hinblick auf neurophysiologische Prozesse adressiert hat, stammt von Aglioti und Kollegen (2008). Die Autoren

konnten zeigen, dass es nur dann zu einer spezifischen Veränderung der kortikalen Erregbarkeit der Repräsentation der Fingermuskulatur kam, wenn die Basketballexperten den Effekt von Freiwürfen antizipierten, nicht aber bei der Vorhersage von Strafstoßen im Fußball. Es ist jedoch zu beachten, dass Fingerbewegungen in der Fußballbedingung keinen leistungsbestimmenden Aspekt darstellen. Durch die großen Unterschiede zwischen den Sportarten hinsichtlich der Bewegungsausführung sowie die nicht vorhandenen Verhaltensdaten der Fußballbedingung ist die Aussagekraft der Ergebnisse bezüglich eines möglichen Transfers der Antizipationsfähigkeiten sehr beschränkt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Conjunction-Analyse zeigen, dass insbesondere cerebelläre, parietale und prämotorische Areale nicht nur an der Vorhersage in der von den Experten beherrschten Sportart beteiligt sind, sondern auch zur Vorhersage in der nicht beherrschten Sportart genutzt werden. Eine Aktivierung in Arealen des AON in beiden Bedingungen unterstützt die Predictive-Coding Theorie von Kilner et al. (2007), dass die höheren, abstrakteren Hierarchieebenen, wie zum Beispiel die Vorhersage des Handlungsziels zur anschließenden Vorhersage der motorischen Befehle (siehe auch Kap. 1.5.3), auch für andere Sportarten genutzt werden könnten. Die Aktivierung des IPL in beiden Sportarten könnte beispielsweise durch den Abgleich des vorhergesagten und des tatsächlichen Effekts zur Ermittlung des Vorhersagefehlers auf höherer Hierarchieebene begründet sein (Farrer et al., 2003; Grefkes et al., 2002; Imamizu et al., 2008; Kilner et al., 2007) und in beiden Sportarten genutzt werden. Ein Expertiseunterschied scheint sich vielmehr in einem quantitativen Unterschied in der Aktivierung dieser Areale zu zeigen. Die stärkere Aktivierung in der Expertisesportart, zum Beispiel in Lobulus VI des Cerebellums, könnte demnach durch stärker ausgeprägte sportartspezifische motorische Repräsentationen zur Vorhersage der kinematischen Informationen auf niedriger Hierarchieebene begründet sein und auf diese Weise auch die Unterschiede in der Antizipationsleistung erklären. Auf Verhaltensebene zeigten die Volleyballexperten eine größere Anzahl korrekt antizipierter Aufschläge in ihrer Expertisebedingung gegenüber der von ihnen nicht beherrschten Sportart. Für die Tennisexperten konnte ein solcher Effekt, vermutlich aufgrund der Unterschiede in der Aufgabenschwierigkeit zwischen beiden Antizipationsbedingungen, nicht gefunden werden. Jedoch waren die Antwortzeiten der Tennisexperten geringer, wenn sie Aufschläge im Tennis antizipierten. Dass die Experten in einer von ihnen nicht beherrschten Sportart eine schlechtere Antizipationsleistung zeigten, passt zu den Ergebnissen von Schorer (2007). Dieser verglich in seiner Untersuchung erfahrene Handballtorhüter, Fortgeschrittene und Novizen während der Vorhersage von Handballsiebenmetern

mit Hockeysiebenmetern, wobei die Handballtorhüter im Vergleich zu den anderen beiden Probandengruppen eine signifikant bessere Antizipationsleistung während der Vorhersage der Handballsiebenmeter erbrachten. Bei der Antizipation in der für sie fremden Sportart unterschieden sich die Handballexperten hingegen nicht von den Fortgeschrittenen und den Novizen. Der Autor kam daher zu dem Ergebnis, dass die Experten nicht in der Lage waren ihre Expertise in Bezug auf die Vorhersage von Handlungseffekten auf eine andere Sportart zu transferieren.

3.5.5 Limitationen

Eine Einschränkung der Interpretierbarkeit der Ergebnisse betrifft den im vorherigen Abschnitt diskutierten Transfer der Antizipationsfähigkeiten auf eine andere Sportart. Durch das gewählte Untersuchungsdesign kann nicht beurteilt werden, ob Experten ihre Antizipationsexpertise zumindest in geringerem Maß auf die von ihnen nicht beherrschte Sportart transferieren oder ob kein Transfer stattfindet und die Antizipationsleistungen wie bei Schorer (2007) auf dem Niveau von Novizen liegen, die in keiner der beiden Sportarten Expertise vorweisen können. Für diese Unterscheidung wäre eine zusätzliche Novizengruppe ohne Erfahrungen mit vergleichbaren Antizipationsaufgaben nötig.

Im vorliegenden Experiment wurde wie in Experiment 2 eine reine Beobachtungsbedingung eingesetzt, um die Antizipation der Tennis- und Volleyballaufschläge mit einer Bewegungsbeobachtungsaufgabe in der jeweiligen Sportart zu kontrastieren, die keine Effektantizipation erfordert und so die Antizipationsprozesse während der Beobachtung der Aufschläge isoliert. Für eine Diskussion der potentiellen Limitationen durch Unterschiede zwischen den Antizipations- und den Beobachtungsbedingungen, wie zum Beispiel der Aufgabenschwierigkeit, siehe Kapitel 2.5.5. Jedoch wurden in Experiment 2 mit Ausnahme des Kontrasts (*Tennis Antizipationsbedingung + Volleyball Antizipationsbedingung*) > (*Tennis Beobachtungsbedingung + Volleyball Beobachtungsbedingung*) zur Bestimmung der expertiseunabhängigen Aktivierung des AON während der Effektantizipation, in allen Analysen Antizipationsbedingungen miteinander verglichen, die zuvor mit der jeweiligen Beobachtungsbedingung kontrastiert worden waren. Es ist davon auszugehen, dass Unterschiede in der Aufgabenschwierigkeit oder der erforderten Reaktion in beiden Antizipationsbedingungen vergleichbare Auswirkungen auf die Aktivierung hatten. Solche Auswirkungen, die in beiden Gruppen vergleichbar waren, wurden durch den anschließenden Kontrast der Antizipationsbedingungen voneinander subtrahiert und somit entfernt. Des Weiteren replizierte der Kontrast zur Unter-

suchung der expertiseunabhängigen Prozesse während der Effektantizipation die Ergebnisse von Experiment 1 sowie von zahlreichen vorangegangenen Studien, die ebenfalls eine stärkere Aktivierung von Arealen des AON während der Effektantizipation zeigen konnten (Abreu et al., 2012; Aglioti et al., 2008; Avenanti et al., 2013; Bishop et al., 2013; Stadler et al., 2011, 2012; Urgesi et al., 2010; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011). Es ist daher nicht davon auszugehen, dass Unterschiede der Stimuli und der Aufgabenstellung zwischen den Antizipations- und den Beobachtungsbedingungen in Experiment 2 einen systematischen Einfluss auf die berichteten Ergebnisse hatten.

3.5.6 Fazit

In Experiment 2 konnte die Aktivierung von Arealen des AON während der Antizipation von Handlungseffekten, die in Experiment 1 gezeigt wurde, repliziert werden. Unabhängig von der Expertise der Beobachter waren der PMC, der IFG, der IPL sowie der SPL mit der Vorhersage der Schlagrichtung von Tennis- und Volleyballaufschlägen assoziiert. Dieses Ergebnis bestätigt somit auch die Theorie zahlreicher Autoren, dass Areale des AON zur Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen, insbesondere im Sport, genutzt werden (Abreu et al., 2012; Avenanti et al., 2013; Bishop et al., 2013; Fontana et al., 2012; Stadler et al., 2012; Urgesi et al., 2010; Wright & Jackson, 2007; Wright et al., 2010, 2011). Während der Antizipation von Aufschlägen in der beherrschten Sportart kam es im Vergleich zu Aufschlägen der nicht beherrschten Sportart zu einer stärkeren Aktivierung des SPL und des SMA sowie vor allem von cerebellären Arealen, die mit der Ausführung von Bewegungen assoziiert werden. Somit konnten die Ergebnisse des Experten-Novizen-Vergleichs aus Experiment 1 repliziert werden. Die Stärke des zweiten Experiments stellt das Untersuchungsdesign mit zwei verschiedenen Expertisegruppen dar, die jeweils auch Aufschläge der nicht beherrschten Sportart antizipieren mussten. Auf diese Weise setzten sich die Novizengruppen nicht aus Probanden zusammen, die weder in der untersuchten Disziplin noch in einer anderen Domäne Expertise aufwiesen, sondern aus Experten, die spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer eigenen Sportart besaßen. Die Aktivierung von Arealen des AON und insbesondere des Cerebellums während der Effektvorhersage ist demnach von der sportartspezifischen Erfahrung des Beobachters abhängig. Die Aktivierung von parietalen und cerebellären Arealen bekräftigt die Theorie, dass Experten auf ihre motorischen Repräsentationen, die sie auch zur Vorhersage der Effekte eigener Bewegungen nutzen, zugreifen, um die beobachteten Bewegungen anhand der erworbenen internen Modelle zu simulieren (Miall, 2003).

Experiment 2 hatte das Ziel zu untersuchen, ob Experten dieses erworbene Antizipationsnetzwerk auch in Sportarten anwenden, für die sie keine Expertise besitzen. Diese Frage wurde in vorherigen neurowissenschaftlichen Expertiseuntersuchungen nicht adressiert. Die entsprechende Conjunction-Analyse der Antizipation in der beherrschten Sportart und der Antizipation in der nicht beherrschten Sportart resultierte in einer gemeinsamen Aktivierung diverser Areale des AON sowie des Cerebellums. Da es in diesen Areale jedoch zu quantitativen Aktivierungsunterschieden zwischen der beherrschten und der nicht beherrschten Sportart kam, können die Ergebnisse gemäß der Predictive Coding Theorie von Kilner et al. (2007) so interpretiert werden, dass hierarchisch höhere Prozesse auch in anderen Sportarten genutzt werden, wohingegen die genaue Vorhersage der Bewegungstrajektorie auf niedrigen Hierarchieebenen der ausgeprägten motorischen Repräsentationen bedarf. Insgesamt hebt Experiment 2 somit die Bedeutung von spezifischen motorischen Repräsentationen hervor, die Experten in vielen Jahren des Trainings erworben haben und zur Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen nutzen.

4 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel den Zusammenhang zwischen eigenen motorischen Repräsentationen innerhalb der Areale des AON und der Vorhersage von Effekten menschlicher Bewegungen zu untersuchen und damit sowohl die Mechanismen der besseren Antizipationsleistungen von Experten im Sport als auch die Bedeutung des AON während der Effektvorhersage zu bestimmen. Dazu wurde in zwei Studien mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie der Einfluss von Expertise auf die Aktivierung von Arealen des AON während der Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen untersucht. In Experiment 1 wurden Tennisexperten und -novizen während der Antizipation von Vorhandschlägen im Tennis miteinander verglichen. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Instruktionen bezüglich der erforderlichen Reaktion auf die Stimuli sollte der Einfluss von verschiedenen Antwortbedingungen auf das AON während der Effektvorhersage untersucht werden. Eine vorangegangene Verhaltensstudie hatte ergeben, dass Experten von einer Antwortbedingung, die zu einer engeren Kopplung von Wahrnehmung und Handlung führt, profitieren (Farrow & Abernethy, 2003). Das Design von Experiment 2 wurde mit zwei verschiedenen Experten Gruppen so gewählt, dass sich die Novizengruppen aus Experten der jeweils anderen Disziplin zusammensetzten und somit der Effekt von sportartspezifischer Expertise auf die Aktivierung von Arealen des AON während der Effektantizipation untersucht werden konnte. Da die Effektantizipation möglicherweise auf der Nutzung von internen Modellen beruht und diese insbesondere in cerebellären Strukturen erwartet werden (Wolpert et al., 1998b), wurde in der vorliegenden Arbeit in beiden Experimenten eine spezielle Normalisierung des Cerebellums zur genauen Lokalisierung möglicher Aktivierungen vorgenommen (siehe Diedrichsen (2006) sowie Kap. 2.3.6). In den bisher durchgeführten Studien zur Untersuchung der expertisebedingten Unterschiede während der Effektantizipation wurde weder die beschriebene SUIT-Toolbox verwendet, noch wurden Aktivierungen des Cerebellums in der Diskussion der Ergebnisse ausgiebig thematisiert.

Auf Verhaltensebene replizierten beide Studien die Ergebnisse der zahlreichen Studien aus dem Bereich der klassischen Expertiseforschung, die eine signifikant bessere Antizipationsleistung von Experten im Vergleich zu Novizen zeigen konnten. Da weder in Experiment 1 noch in Experiment 2 Informationen über den Ballflug verfügbar waren, bestätigen die besseren Antizipationsleistungen der Experten die Annahme, dass Athleten in schnellen Spielsportarten, in denen sie Entscheidungen unter enormen Zeitdruck treffen müssen, auf kinematische Informationen der beobachteten Bewegung zurückgreifen, um deren Effekt zu antizipieren

(siehe zum Beispiel Abernethy et al., 2001; Williams et al., 2009). Dass die Verarbeitung dieser kinematischen Informationen mit Aktivierung in Arealen des AON assoziiert ist, zeigen die hirnhysiologischen Ergebnisse des expertisunabhängigen Vergleichs der Antizipations- mit den reinen Bewegungsbeobachtungsbedingungen in beiden Experimenten. Sowohl die Vorhersage der Vorhandschläge im Tennis als auch die Vorhersage der Tennis- und Volleyballaufschläge führte im Vergleich zur Beobachtung des Ballprellens in der jeweiligen Sportart unabhängig von der Expertise der Probanden unter anderem zu einer signifikant stärkeren Aktivierung des dPMC, des IFG, des SPL sowie Lobulus VI und Crus I des Cerebellums. Beide Experimente stützen damit die Annahme, dass die Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen eine wichtige Funktion des AON darstellt (Gazzola & Keysers, 2009; Prinz, 2006; Schütz-Bosbach & Prinz, 2007; Urgesi et al., 2010) und dabei Areale umfasst, die nicht als Teil des SNS betrachtet werden (Zentgraf et al., 2011).

Die Bedeutung von posterior parietalen und cerebellären Strukturen für die Effektivorhersage konnte vor allem auch durch die parametrische Analyse aufgezeigt werden. In beiden Studien resultierte eine höhere Anzahl an korrekt antizipierten Schlägen in einer stärkeren Aktivierung des SPL sowie von Lobulus VIIa. Da diese Areale als wichtiger Bestandteil der internen Modelle diskutiert werden (Miall, 2003; Wolpert et al., 1998a,b), liefern die Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass das inverse sowie das Vorwärtsmodell zur Effektivorhersage genutzt werden (siehe zum Beispiel Blakemore & Decety, 2001; Wolpert et al., 2003). Dass der Vorhersageprozess insbesondere in den Arealen des Cerebellums sowie parietalen Arealen stattfindet, die auch genutzt werden, um den Effekt von eigenen Bewegungen vorherzusagen, wird in besonderem Maß durch die Ergebnisse der Experten-Novizen-Vergleiche unterstützt. Wenn die Probanden eine ausgeprägte Expertise für eine Sportart besaßen, hatten beide Studien gemein, dass die Antizipation von Handlungseffekten in dieser Disziplin unter anderem zu einer stärkeren Aktivierung des SPL sowie von Crus I, Lobulus VI, VII und VIII führte. Die expertisunabhängige Aktivierung zeigte sich somit vor allem in Arealen des Cerebellums, die auch an der Ausführung von Arm- und Handbewegungen beteiligt sind (Dimitrova et al., 2006; Donchin et al., 2012; Grodd et al., 2001; Thickbroom et al., 2003). Für Tennisschläge konnten beispielsweise Williams und Kollegen (2009) zeigen, dass die Arm- und Handstellung eine entscheidende Information für die Vorhersage darstellt. Und auch beim Volleyballaufschlag ist davon auszugehen, dass die Bewegung der oberen Extremitäten ein leistungsbestimmender Faktor für die Effektivorhersage ist (Lee, 2010). Die Ergebnisse aus beiden vorliegenden Studien unterstützen demnach die Theorie, dass eigene motorische Repräsentatio-

nen genutzt werden, um die beobachtete Bewegung zur Vorhersage des Effekts intern zu simulieren (siehe zum Beispiel Prinz, 2006). Ferner deuten sie darauf hin, dass Experten während der Antizipation in der von ihnen beherrschten Sportart auf motorische Repräsentationen zurückgreifen, die sie in vielen Jahren des Trainings erworben haben.

Durch die Untersuchung von Tennis- und Volleyballexperten konnte in Experiment 2 außerdem gezeigt werden, dass es bei Experten zu einer spezifischen Nutzung dieser eigenen motorischen Repräsentationen in der jeweiligen Expertisesportart kommt. Denn in Experiment 2 setzten sich die Novizengruppen nicht aus komplett unerfahrenen Versuchspersonen zusammen, sondern bestanden aus den Experten der jeweils anderen Disziplin, die spezifische Antizipationsfähigkeiten in ihrer Sportart besaßen. In diesem konservativen Ansatz zur Ermittlung von Expertiseunterschieden resultierte die Vorhersage in der Expertisesportart im Vergleich zur Vorhersage in der nicht beherrschten Sportart in einer stärkeren Aktivierung von prämotorischen, parietalen und cerebellären Arealen. Gleichzeitig ergab eine Conjunction-Analyse zwischen der Antizipation in der Expertensportart und der Antizipation in der Novizensportart eine gemeinsame Aktivierung in zahlreichen Arealen des AON. Darunter waren auch Areale, die in der beherrschten Sportart eine höhere Aktivierung aufwiesen. Gemäß der Predictive Coding Theorie von Kilner et al. (2007) können die Ergebnisse so interpretiert werden, dass hierarchisch höhere Prozesse auch in anderen Sportarten genutzt werden, wohingegen die präzise Vorhersage der Bewegungstrajektorie auf niedrigen Hierarchieebenen der ausgeprägten spezifischen motorischen Repräsentationen bedarf.

Die Frage, welchen Einfluss unterschiedlich instruierte Antwortbedingungen auf die Antizipationsleistung sowie die Aktivierung des AON haben, wurde in der vorliegenden Arbeit ebenfalls adressiert. Durch eine Antizipationsbedingung, in der die Versuchsteilnehmer nicht die Richtung des Ballflugs sondern ihre eigene Reaktion auf die beobachtete Handlung vorhersagen mussten, sollten die Forderungen von Farrow & Abernethy (2003) sowie Dick et al. (2009) nach realitätsnahen Untersuchungsbedingungen von Expertiseleistungen in einem fMRT-tauglichen Design umgesetzt werden. Unabhängig vom Expertiseniveau der Probanden resultierte die Vorhersage der eigenen Reaktion in einer stärkeren Aktivierung von prämotorischen und posterior parietalen Strukturen. Der Vergleich der beiden Antwortbedingungen führte bei den Tennisexperten nur zu sehr geringen Aktivierungsunterschieden und auch die Verhaltensdaten wiesen keine Differenzen auf. Dies deutet zusammen mit den Ergebnissen von Farrow und Abernethy darauf hin, dass die Antwortbedingung nur dann einen Einfluss auf die Antizipationsprozesse der Experten hat, wenn die erforderliche Antwort auf die beo-

bachtete Bewegung der realistischen Reaktion entspricht, die durch jahreslanges Training erlernt wurde.

Es existieren jedoch nach wie vor Defizite in Bezug auf die Beschreibung der neuronalen Mechanismen, die der Effektvorhersage im Allgemeinen und der Leistung von Experten im Besonderen zugrunde liegen. So führt die Predictive Coding Theorie von Kilner et al. (2007) unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Imamizu und Kawato (2008), Farrow und Abernethy (2012) sowie der vorliegenden Arbeit zu der Erwartung, dass Kontextinformationen bei der Antizipation von Handlungseffekten eine wichtige Rolle spielen und innerhalb des AON, insbesondere im SPL, integriert werden. Daraus resultiert die Forderung für zukünftige Studien, den Einfluss von Kontextinformationen auf die Verarbeitungsprozesse während der Effektantizipation durch eine systematische Manipulation der verfügbaren Informationen zur Situation, wie zum Beispiel des Spielstands während der Antizipation von Aufschlägen im Tennis, zu bestimmen.

Wie in Kapitel 2.5.5 bereits beschrieben wurde, unterliegt der Vergleich der Antizipationsbedingung mit der Kontrollbedingung des Ballprellens einigen Limitationen. Dies betrifft beispielsweise die Unterschiede hinsichtlich der erfordernten Reaktion sowie der Aufgabenschwierigkeit. Daher erscheint der Entwurf einer Kontrollbedingung, die sich im Idealfall nur in Hinblick auf die Antizipationsanforderungen von der Antizipationsbedingung unterscheidet, gleichermaßen lohnenswert wie diffizil. Durch eine solche Kontrollbedingung ließen sich die neuronalen Prozesse der Effektvorhersage in weiteren Studien noch präziser isolieren und eindeutig auf diese Handlung zurückführen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen die Bedeutung von Arealen des AON für die Vorhersage von Effekten beobachteter Handlungen bestätigen. Die Effektantizipation in einer Sportart, für die die Probanden durch langjähriges Training stärker ausgeprägte interne Repräsentationen besitzen, ist dabei insbesondere mit einer stärkeren Aktivierung in posterior parietalen und cerebellären Arealen assoziiert. Ferner hat die vorliegende Arbeit gezeigt, dass der Vergleich von Experten einer Sportart mit Novizen respektive Experten in einer anderen Disziplin eine hervorragende Möglichkeit zur Untersuchung des Einflusses von eigenen motorischen Repräsentationen auf die Vorhersage von Handlungseffekten darstellt. Daher sollte dieser Vergleich auch in zukünftigen Studien eingesetzt werden, um weiterführende Erkenntnisse über die neuronalen Prozesse der Effektantizipation zu gewinnen.

5 Literaturverzeichnis

- Abernethy, B. (1987). Selective attention in fast ball sports II: Expert-novice differences. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *19*, 7–16.
- Abernethy, B. (1988). The effects of age and expertise upon perceptual skill development in a racquet sport. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *59*, 210–221.
- Abernethy, B. (1990). Anticipation in squash: differences in advance cue utilization between expert and novice players. *Journal of Sports Sciences*, *8*, 17–34.
- Abernethy, B., Baker, J., & Côté, J. (2005). Transfer of pattern recall skills may contribute to the development of sport expertise. *Applied Cognitive Psychology*, *19*, 705–718.
- Abernethy, B., Farrow, D., & Berry, J. (2003). Constraints and issues in the development of a general theory of expert perceptual-motor performance. In J. L. Starkes & K. A. Ericsson (Eds.), *Expert performance in sports. Advances in research on sport expertise* (pp. 349–369). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception*, *30*, 233–252.
- Abernethy, B., & Russell, D. G. (1987). The relationship between expertise and visual search strategy in a racquet sport. *Human Movement Science*, *6*, 283–319.
- Abernethy, B., Thomas, K. T., & Thomas, J. (1993). Strategies for improving understanding of motor expertise. In J. L. Starkes & F. Allard (Eds.), *Advances in psychology: Vol. 102. Cognitive issues in motor expertise* (pp. 317–356). Amsterdam, New York: North-Holland.
- Abreu, A. M., Macaluso, E., Azevedo, R. T., Cesari, P., Urgesi, C., & Aglioti, S. M. (2012). Action anticipation beyond the action observation network: a functional magnetic resonance imaging study in expert basketball players. *European Journal of Neuroscience*, *35*, 1646–1654.
- Adam, J. J., Paas, F. G. W. C., Buekers, M. J., Wuyts, I. J., Spijkers, W. A. C., & Wallmeyer, P. (1996). Perception-action coupling in choice reaction time tasks. *Human Movement Science*, *15*, 511–519.
- Afonso, J., Garganta, J., McRobert, A. P., Williams, A. M., & Mesquita, I. (2012). The perceptual cognitive processes underpinning skilled performance in volleyball: Evidence from eye-movements and verbal reports of thinking involving an in situ representative task in situ representative task. *Journal of Sports Science and Medicine*, *11*, 339–345.
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, *11*, 1109–1116.
- Allard, F., Graham, S., & Paarsalu, M. E. (1980). Perception in sport: Basketball. *Journal of Sport Psychology*, *2*, 14–21.
- Avenanti, A., Annella, L., Candidi, M., Urgesi, C., & Aglioti, S. M. (2013). Compensatory plasticity in the action observation network: virtual lesions of STS enhance anticipatory simulation of seen actions. *Cerebral Cortex*, *23*, 570–580.
- Baker, J., Côté, J., & Abernethy, B. (2003a). Sport-specific practice and the development of expert decision-m in team ball sports. *Journal of Applied Sport Psychology*, *15*, 12–25.

- Baker, J., Horton, J., Robertson-Wilson, J., & Wall, M. (2003b). Nurturing sport expertise: factors influencing the development of elite athlete. *Journal of Sports Science and Medicine*, *2*, 1–9.
- Balser, N., Lorey, B., Pilgramm, S., Stark, R., Bischoff, M., Zentgraf, K., Williams, A. M., & Munzert, J. (2014). Prediction of human actions: Expertise and task-related effects on neural activation of the action observation network. *Human Brain Mapping, angenommen*.
- Bassili, J. N. (1978). Facial motion in the perception of faces and of emotional expression. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*, 373–379.
- Beilock, S. L., Carr, T. H., MacMahon, C., & Starkes, J. L. (2002). When paying attention becomes counterproductive: impact of divided versus skill-focused attention on novice and experienced performance of sensorimotor skills. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *8*, 6–16.
- Binkofski, F., Buccino, G., Stephan, K. M., Rizzolatti, G., Seitz, R. J., & Freund, H. J. (1999). A parieto-premotor network for object manipulation: evidence from neuroimaging. *Experimental Brain Research*, *128*, 210–213.
- Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balser, N., Baumgartner, E., Hohmann, T., Stark, R., Vaitl, D., & Munzert, J. (2012). Motor familiarity: brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*, 2085–2092.
- Bishop, D. T., Wright, M. J., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2013). Neural bases for anticipation skill in soccer: an fMRI study. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *35*, 98–109.
- Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion. *Annual Review of Psychology*, *58*, 47–73.
- Blakemore, S.-J., & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*, 561–567.
- Blakemore, S.-J., & Frith, C. (2005). The role of motor contagion in the prediction of action. *Neuropsychologia*, *43*, 260–267.
- Blakemore, S.-J., Rees, G., & Frith, C. D. (1998). How do we predict the consequences of our actions? A functional imaging study. *Neuropsychologia*, *36*, 521–529.
- Blakemore, S.-J., & Sirigu, A. (2003). Action prediction in the cerebellum and in the parietal lobe. *Experimental Brain Research*, *153*, 239–245.
- Bootsma, R. J. (1989). Accuracy of perceptual processes subserving different perception-action systems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41 A*, 489–500.
- Bouchard, C., An, P., Rice, T., Skinner, J. S., Wilmore, J. H., Gagnon, J., Pérusse, L., Leon, A. S., & Rao, D. C. (1999). Familial aggregation of VO₂max response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. *Journal of Applied Physiology*, *87*, 1003–1008.
- Bouchard, C., Dionne, F. T., Simoneau, J. A., & Boulay, M. R. (1992). Genetics of aerobic and anaerobic performances. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *20*, 27–58.

- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R. J., Zilles, K., Rizzolatti, G., & Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*, 400–404.
- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G. R., Zilles, K., Freund, H.-j., & Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron*, *42*, 323–334.
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an FMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, *15*, 1243–1249.
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., Haggard, P., & Gre, J. (2006). Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Current Biology*, *16*, 1905–1910.
- Cañal-Bruland, R., & Kreinbucher, C., & Oudejans, R. R. (2012). Motor expertise influences strike and ball judgements in baseball. *International Journal of Sport Psychology*, *43*, 137–152.
- Cañal-Bruland, R., Mooren, M., & Savelsbergh, G. J. P. (2011a). Differentiating experts' anticipatory skills in beach volleyball. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *82*, 667–674.
- Cañal-Bruland, R., van Ginneken, W. F., van der Meer, B. R., & Williams, A. M. (2011b). The effect of local kinematic changes on anticipation judgments. *Human Movement Science*, *30*, 495–503.
- Candidi, M., Urgesi, C., Ionta, S., & Aglioti, S. M. (2008). Virtual lesion of ventral premotor cortex impairs visual perception of biomechanically possible but not impossible actions. *Social Neuroscience*, *3*, 388–400.
- Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*, 69–74.
- Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *NeuroImage*, *50*, 1148–1167.
- Cattaneo, L., Fasanelli, M., Andreatta, O., Bonifati, D. M., Barchiesi, G., & Caruana, F. (2012). Your actions in my cerebellum: Subclinical deficits in action observation in patients with unilateral chronic cerebellar stroke. *Cerebellum*, *11*, 264–271.
- Cerminara, N. L., Apps, R., & Marple-Horvat, D. E. (2009). An internal model of a moving visual target in the lateral cerebellum. *Journal of Physiology*, *587*, 429–442.
- Chambers, C. D., Bellgrove, M. A., Stokes, M. G., Henderson, T. R., Garavan, H., Robertson, I. H., Morris, A. P., & Mattingley, J. B. (2006). Executive "brake failure" following deactivation of human frontal lobe. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 444–455.
- Chang, D. H. F., & Troje, N. F. (2009). Characterizing global and local mechanisms in biological motion perception. *Journal of Vision*, *9*, 1–10.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, *12*, 478–484.
- Clarke, T. J., Bradshaw, M. F., Field, D. T., Hampson, S. E., & Rose, D. (2005). The perception of emotion from body movement in point-light displays of interpersonal dialogue. *Perception*, *34*, 1171–1180.

- Clower, D. M., West, R. A., Lynch, J. C., & Strick, P. L. (2001). The inferior parietal lobule is the target of output from the superior colliculus, hippocampus, and cerebellum. *Journal of Neuroscience*, *21*, 6283–6291.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 201–215.
- Crognier, L., & Féry, Y.-A. (2005). Effect of tactical initiative on predicting passing shots in tennis. *Applied Cognitive Psychology*, *19*, 637–649.
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. C. de, Kraemer, D. J. M., Kelley, W. M., & Grafton, S. T. (2009). Sensitivity of the action observation network to physical and observational learning. *Cerebral Cortex*, *19*, 315–326.
- Culham, J. C., & Kanwisher, N. G. (2001). Neuroimaging of cognitive functions in human parietal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *11*, 157–163.
- Culham, J. C., & Valyear, K. F. (2006). Human parietal cortex in action. *Current Opinion in Neurobiology*, *16*, 205–212.
- Cutting, J. E., & Kozlowski, L. T. (1977). Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *9*, 353–356.
- Davids, K., & Baker, J. (2007). Genes, environment and sport performance: why the nature-nurture dualism is no longer relevant. *Sports Medicine*, *37*, 961–980.
- Desmond, J. E., & Fiez, J. A. (1998). Neuroimaging studies of the cerebellum: language, learning and memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 355–362.
- Dicks, M., Davids, K., & Button, C. (2009). Representative task designs for the study of perception and action in sport. *International Journal of Sport Psychology*, *40*, 506–524.
- Diedrichsen, J. (2006). A spatially unbiased atlas template of the human cerebellum. *NeuroImage*, *33*, 127–138.
- Diedrichsen, J., Balsters, J. H., Flavell, J., Cussans, E., & Ramnani, N. (2009). A probabilistic MR atlas of the human cerebellum. *NeuroImage*, *46*, 39–46.
- Diersch, N., Mueller, K., Cross, E. S., Stadler, W., Rieger, M., Schütz-Bosbach, S., & Avenanti, A. (2013). Action prediction in younger versus older adults: Neural correlates of motor familiarity. *PLoS ONE*, *8*, e64195.
- Dimitrova, A., Greiff, A. de, Schoch, B., Gerwig, M., Frings, M., Gizewski, E. R., & Timmann, D. (2006). Activation of cerebellar nuclei comparing finger, foot and tongue movements as revealed by fMRI. *Brain Research Bulletin*, *71*, 233–241.
- Donchin, O., Rabe, K., Diedrichsen, J., Lally, N., Schoch, B., Gizewski, E. R., & Timmann, D. (2012). Cerebellar regions involved in adaptation to force field and visuomotor perturbation. *Journal of Neurophysiology*, *107*, 134–147.
- 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.
- Ericsson, K. A. (2003). Development of elite performance and deliberate practice: An update from the perspective of the expert performance approach. In J. L. Starks & K. A. Ericsson (Eds.), *Expert performance in sports. Advances in research on sport expertise* (pp. 49–85). Champaign, IL: Human Kinetics.

- Ericsson, K. A. (2013). Training history, deliberate practice and elite sports performance: an analysis in response to Tucker and Collins review - what makes champions? *British Journal of Sports Medicine*, *47*, 533–535.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, *100*, 363–406.
- Ericsson, K. A., & Lehmann, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, *47*, 273–305.
- Ericsson, K. A., & Smith, J. (1991). *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 2608–2611.
- Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., & Jeannerod, M. (2003). Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study. *NeuroImage*, *18*, 324–333.
- Farrow, D., & Abernethy, B. (2003). Do expertise and the degree of perception - action coupling affect natural anticipatory performance? *Perception*, *32*, 1127–1139.
- Farrow, D., & Reid, M. (2012). The contribution of situational probability information to anticipatory skill. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *15*, 368–373.
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Shah, N. J., Weiss, P. H., Halligan, P. W., Grosse-Ruyken, M., Ziemons, K., Zilles, K., & Freund, H. J. (2000). Line bisection judgments implicate right parietal cortex and cerebellum as assessed by fMRI. *Neurology*, *54*, 1324–1331.
- Fontana, A. P., Kilner, J. M., Rodrigues, E. C., Joffily, M., Nighoghossian, N., Vargas, C. D., & Sirigu, A. (2012). Role of the parietal cortex in predicting incoming actions. *NeuroImage*, *59*, 556–564.
- Fourkas, A. D., Bonavolontà, V., Avenanti, A., & Aglioti, S. M. (2008). Kinesthetic imagery and tool-specific modulation of corticospinal representations in expert tennis players. *Cerebral Cortex*, *18*, 2382–2390.
- Fox, R., & McDaniel, C. (1982). The perception of biological motion by human infants. *Science*, *218*, 486–487.
- Frey, S. H., & Gerry, V. E. (2006). Modulation of neural activity during observational learning of actions and their sequential orders. *Journal of Neuroscience*, *26*, 13194–13201.
- Gallagher, H. L., & Frith, C. D. (2004). Dissociable neural pathways for the perception and recognition of expressive and instrumental gestures. *Neuropsychologia*, *42*, 1725–1736.
- Gallese, V., & Goldmann, A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 493–501.
- Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 396–403.
- Gangitano, M., Mottaghy, F. M., & Pascual-Leone, A. (2001). Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*, *12*, 1489–1492.
- Gangitano, M., Mottaghy, F. M., & Pascual-Leone, A. (2004). Modulation of premotor mirror neuron activity during observation of unpredictable grasping movements. *European Journal of Neuroscience*, *20*, 2193–2202.

- Gazzola, V., & Keysers, C. (2009). The observation and execution of actions share motor and somatosensory voxels in all tested subjects: single-subject analyses of unsmoothed fMRI data. *Cerebral Cortex*, *19*, 1239–1255.
- Gazzola, V., Rizzolatti, G., Wicker, B., & Keysers, C. (2007a). The anthropomorphic brain: the mirror neuron system responds to human and robotic actions. *NeuroImage*, *35*, 1674–1684.
- Gazzola, V., van der Worp, H., Mulder, T., Wicker, B., Rizzolatti, G., & Keysers, C. (2007b). Aphasics born without hands mirror the goal of hand actions with their feet. *Current Biology*, *17*, 1235–1240.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glickstein, M. (1993). Motor skills but not cognitive tasks. *Trends in Neurosciences*, *16*, 450–451.
- Grafton, S. T., Arbib, M. A., Fadiga, L., & Rizzolatti, G. (1996). Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Experimental Brain Research*, *112*, 103–111.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: with special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, *77*, 73–99.
- Grefkes, C., Weiss, P. H., Zilles, K., & Fink, G. R. (2002). Crossmodal processing of object features in human anterior intraparietal cortex: an fMRI study implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron*, *35*, 173–184.
- Grèzes, J., & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping*, *12*, 1–19.
- Grodd, W., Hülsmann, E., Lotze, M., Wildgruber, D., & Erb, M. (2001). Sensorimotor mapping of the human cerebellum: fMRI evidence of somatotopic organization. *Human Brain Mapping*, *13*, 55–73.
- Groot, A. D. de. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague: Mouton Publishers.
- Grossman, E., Donnelly, M., Price, R., Pickens, D., Morgan, V., Neighbor, G., & Blake, R. (2000). Brain areas involved in perception of biological motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 711–720.
- Gustin, W. C. (1985). The development of exceptional research mathematicians. In B. S. Bloom & L. A. Sosniak (Eds.), *Developing talent in young people* (1st ed., pp. 270–331). New York: Ballantine Books.
- Hagemann, N., Tietjens, M., & Strauß, B. (2007). Expertiseforschung im Sport. In N. Hagemann, M. Tietjens, & B. Strauß (Hrsg.), *Psychologie der sportlichen Höchstleistung. Grundlagen und Anwendungen der Expertiseforschung im Sport* (S. 7–16). Göttingen: Hogrefe.
- Hamilton, A. F. C. de, Frith, U., & Grafton, S. T. (2006). Where does your own action influence your perception of another person's action in the brain? *NeuroImage*, *29*, 524–535.
- Hamilton, A. F. C. de, & Grafton, S. T. (2006). Goal representation in human anterior intraparietal sulcus. *Journal of Neuroscience*, *26*, 1133–1137.
- Hamilton, A. F. C. de, Wolpert, D., & Frith, U. (2004). Your own action influences how you perceive another person's action. *Current Biology*, *14*, 493–498.

- Hari, R., Forss, N., Avikainen, S., Kirveskari, E., Salenius, S., & Rizzolatti, G. (1998). Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*, 15061–15065.
- Hauser, M., & Wood, J. (2010). Evolving the capacity to understand actions, intentions, and goals. *Annual Review of Psychology*, *61*, 303–324.
- Hayes, J. R. (1989). *The complete problem solver* (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Helsen, W. F., Starkes, J. L., & Hodges, N. J. (1998). Team sports and the theory of deliberate practice. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *20*, 12–34.
- Hodges, N. J., & Starkes, J. L. (1996). Wrestling with the nature expertise: a sport specific test of Ericsson, Krampe and Tesch-Römer's (1993) theory of "deliberate practice". *International Journal of Sport Psychology*, *27*, 400–424.
- Holmes, G. (1939). The cerebellum of man. *Brain*, *62*, 1–30.
- Hommel, B. (1990). *Quellen der Interferenz beim Simon-Effekt: Eine Untersuchung zur Verwendung räumlicher Information bei der Auswahl und Planung einer einfachen Handlung* (Dissertation). Universität Bielefeld, Bielefeld.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, *55*, 270–279.
- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, *59*, 176–186.
- Hommel, B. (2003). Planning and representing intentional action. *The Scientific World Journal*, *3*, 593–608.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849–878.
- Hubert, M., & van der Veen, S. (2008). Outlier detection for skewed data. *Journal of Chemometrics*, *22*, 235–246.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2008). *Functional magnetic resonance imaging* (2nd ed.). Sunderland: Sinauer Associates.
- Husain, M., & Nachev, P. (2007). Space and the parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 30–36.
- Husain, M., & Rorden, C. (2003). Non-spatially lateralized mechanisms in hemispatial neglect. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*, 26–36.
- Huys, R., Cañal-Bruland, R., Hagemann, N., Beek, P. J., Smeeton, N. J., & Williams, A. M. (2009). Global information pickup underpins anticipation of tennis shot direction. *Journal of Motor Behavior*, *41*, 158–171.
- Iacoboni, M. (2009). Imitation, Empathy, and Mirror Neurons. *Annual Review of Psychology*, *60*, 653–670.
- Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*, 942–951.

- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (2005). Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biology*, *3*, e79.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, *286*, 2526–2528.
- Imaizumi, S., Mori, K., Kiritani, S., Kawashima, R., Sugiura, M., Fukuda, H., Itoh, K., Kato, T., Nakamura, A., Hatano, K., Kojima, S., & Nakamura, K. (1997). Vocal identification of speaker and emotion activates different brain regions. *Neuroreport*, *8*, 2809–2812.
- Imamizu, H., & Kawato, M. (2008). Neural correlates of predictive and postdictive switching mechanisms for internal models. *Journal of Neuroscience*, *28*, 10751–10765.
- Ito, M. (2008). Control of mental activities by internal models in the cerebellum. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*, 304–313.
- Jacobs, A., & Shiffrar, M. (2005). Walking perception by walking observers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*, 157–169.
- Jakobs, O., Wang, L. E., Dafotakis, M., Grefkes, C., Zilles, K., & Eickhoff, S. B. (2009). Effects of timing and movement uncertainty implicate the temporo-parietal junction in the prediction of forthcoming motor actions. *NeuroImage*, *47*, 667–677.
- Janelle, C. M., Duley, A. R., & Coombes, S. A. (2004). Psychophysiological and related indices of attention during motor skill acquisition. In A. M. Williams & N. J. Hodges (Eds.), *Skill acquisition in sport. Research, theory and practice* (pp. 282–308). London, New York: Routledge.
- Janelle, C. M., & Hillman, C. H. (2003). Expert performance in sport. In J. L. Starkes & K. A. Ericsson (Eds.), *Expert performance in sports. Advances in research on sport expertise* (pp. 19–49). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, *14*, 201–211.
- Johnson-Frey, S. H., Maloof, F. R., Newman-Norlund, R., Farrer, C., Inati, S., & Grafton, S. T. (2003). Actions or hand-object interactions? Human inferior frontal cortex and action observation. *Neuron*, *39*, 1053–1058.
- Kalinowski, A. (1985). The development of Olympic swimmers. In B. S. Bloom & L. A. Sosniak (Eds.), *Developing talent in young people* (1st ed., pp. 139–192). New York: Ballantine Books.
- Kawato, M., Kuroda, T., Imamizu, H., Nakano, E., Miyauchi, S., & Yoshioka, T. (2003). Internal forward models in the cerebellum: fMRI study on grip force and load force coupling. *Progress in Brain Research*, *142*, 171–188.
- Kelly, R. M., & Strick, P. L. (2003). Cerebellar loops with motor cortex and prefrontal cortex of a nonhuman primate. *Journal of Neuroscience*, *23*, 8432–8444.
- Keysers, C., & Gazzola, V. (2007). Integrating simulation and theory of mind: from self to social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 194–196.
- Kilner, J. M., Friston, K. J., & Frith, C. D. (2007). Predictive coding: an account of the mirror neuron system. *Cognitive Processing*, *8*, 159–166.
- Kilner, J. M., Vargas, C., Duval, S., Blakemore, S.-J., & Sirigu, A. (2004). Motor activation prior to observation of a predicted movement. *Nature Neuroscience*, *7*, 1299–1301.

- Knoblich, G., & Flach, R. (2001). Predicting the effects of actions: interactions of perception and action. *Psychological Science, 12*, 467–472.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science, 297*, 846–848.
- Koski, L., Wohlschläger, A., Bekkering, H., Woods, R. P., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J. C., & Iacoboni, M. (2002). Modulation of motor and premotor activity during imitation of target-directed actions. *Cerebral Cortex, 12*, 847–855.
- Kozlowski, L. T., & Cutting, J. E. (1977). Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display. *Perception & Psychophysics, 21*, 575–580.
- Krams, M., Rushworth, M. F., Deiber, M. P., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (1998). The preparation, execution and suppression of copied movements in the human brain. *Experimental Brain Research, 120*, 386–398.
- Kumagai-Eto, R., Kaseda, Y., Tobimatsu, S., Uozumi, T., Tsuji, S., & Nakamura, S. (2004). Subclinical cranial nerve involvement in hereditary motor and sensory neuropathy: a combined conduction study with electrical and magnetic stimulation. *Clinical Neurophysiology, 115*, 1689–1696.
- Lee, S.-M. (2010). Does your eye keep on the ball? The strategy of eye movement for volleyball defensive players during spike serve reception. *International Journal of Applied Sport Science, 22*, 128–137.
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H. M., Braun, C., & Birbaumer, N. (2003). The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *NeuroImage, 20*, 1817–1829.
- Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 31*, 210–220.
- Maeda, F., Kleiner-Fisman, G., & Pascual-Leone, A. (2002). Motor facilitation while observing hand actions: specificity of the effect and role of observer's orientation. *Journal of Neurophysiology, 87*, 1329–1335.
- Mann, D., Dicks, M., Cañal-Bruland, R., & van der Kamp, J. (2013). Neurophysiological studies may provide a misleading picture of how perceptual-motor interactions are coordinated. *i-Perception, 4*, 78–80.
- Mann, D. T. Y., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 29*, 457–478.
- McPherson, S. L., & MacMahon, C. (2008). How baseball players prepare to bat: tactical knowledge as a mediator of expert performance in baseball. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 30*, 755–778.
- McRobert, A. P., Ward, P., Eccles, D. W., & Williams, A. M. (2011). The effect of manipulating context-specific information on perceptual–cognitive processes during a simulated anticipation task. *British Journal of Psychology, 102*, 519–534.
- Mecklinger, A., Gruenewald, C., Besson, M., Magnié, M.-N., & Cramon, D. Y. von. (2002). Separable neuronal circuitries for manipulable and non-manipulable objects in working memory. *Cerebral Cortex, 12*, 1115–1123.

- Miall, R. C. (2003). Connecting mirror neurons and forward models. *Neuroreport*, *14*, 2135–2137.
- Miall, R. C., & King, D. (2008). State estimation in the cerebellum. *Cerebellum*, *7*, 572–576.
- Miall, R. C., Weir, D. J., Wolpert, D. M., & Stein, J. F. (1993). Is the cerebellum a smith predictor? *Journal of Motor Behavior*, *25*, 203–216.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural Networks*, *9*, 1265–1279.
- Molenberghs, P., Cunnington, R., & Mattingley, J. B. (2012). Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*, 341–349.
- Molnar-Szakacs, I., Iacoboni, M., Koski, L., & Mazziotta, J. C. (2005). Functional segregation within pars opercularis of the inferior frontal gyrus: evidence from fMRI studies of imitation and action observation. *Cerebral Cortex*, *15*, 986–994.
- Monsaas, J. A. (1985). Learning to be a world-class tennis player. In B. S. Bloom & L. A. Sosniak (Eds.), *Developing talent in young people* (1st ed., pp. 211–269). New York: Ballantine Books.
- Mori, S., & Shimada, T. (2013). Expert anticipation from deceptive action. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*, 751–770.
- Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*, *20*, 750–756.
- Müller, F., & Dichgans, J. (1994). Impairments of precision grip in two patients with acute unilateral cerebellar lesions: a simple parametric test for clinical use. *Neuropsychologia*, *32*, 265–269.
- Müller, S., Abernethy, B., & Farrow, D. (2006). How do world-class cricket batsmen anticipate a bowler's intention? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*, 2162–2186.
- Müller, S., Abernethy, B., Reece, J., Rose, M., Eid, M., McBean, R., Hart, T., & Abreu, C. (2009). An in-situ examination of the timing of information pick-up for interception by cricket batsmen of different skill levels. *Psychology of Sport and Exercise*, *10*, 644–652.
- Munzert, J. (1995). Expertise im Sport: Ein kritischer Übersichtsbeitrag. *Psychologie und Sport*, *2*, 122–131.
- Munzert, J., Zentgraf, K., Stark, R., & Vaitl, D. (2008). Neural activation in cognitive motor processes: comparing motor imagery and observation of gymnastic movements. *Experimental Brain Research*, *188*, 437–444.
- Müsseler, J. (1995). *Wahrnehmung und Handlungssteuerung. Effekte kompatibler und inkompatibler Reize bei der Initiierung und Ausführung von Reaktionssequenzen*. Aachen: Shaker.
- Neal, A., & Kilner, J. M. (2010). What is simulated in the action observation network when we observe actions? *European Journal of Neuroscience*, *32*, 1765–1770.
- Nielsen, J. B., & Cohen, L. G. (2008). The Olympic brain. Does corticospinal plasticity play a role in acquisition of skills required for high-performance sports? *Journal of Physiology*, *586*, 65–70.

- Nitschke, M. F., Kleinschmidt, A., Wessel, K., & Frahm, J. (1996). Somatotopic motor representation in the human anterior cerebellum. A high-resolution functional MRI study. *Brain, 119*, 1023–1029.
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG* (2nd ed.). New York: Oxford University Press.
- Oldfield, R. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia, 9*, 97–113.
- O'Reilly, J. X., Beckmann, C. F., Tomassini, V., Ramnani, N., & Johansen-Berg, H. (2010). Distinct and overlapping functional zones in the cerebellum defined by resting state functional connectivity. *Cerebral Cortex, 20*, 953–965.
- Oztop, E., Wolpert, D., & Kawato, M. (2005). Mental state inference using visual control parameters. *Cognitive Brain Research, 22*, 129–151.
- Patel, V. L., & Groen, G. J. (1991). The general and specific nature of medical expertise: A critical look. In K. A. Ericsson & J. Smith (Eds.), *Toward a general theory of expertise. Prospects and limits* (pp. 93–125). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Patuzzo, S., Fiaschi, A., & Manganotti, P. (2003). Modulation of motor cortex excitability in the left hemisphere during action observation: a single- and paired-pulse transcranial magnetic stimulation study of self- and non-self-action observation. *Neuropsychologia, 41*, 1272–1278.
- Paull, G., & Glencross, D. (1997). Expert perception and decision making in baseball. *International Journal of Sport Psychology, 28*, 35–56.
- Pavlova, M., Krägeloh-Mann, I., Sokolov, A., & Birbaumer, N. (2001). Recognition of point-light biological motion displays by young children. *Perception, 30*, 925–933.
- Pearce, A. J., Thickbroom, G. W., Byrnes, M. L., & Mastaglia, F. L. (2000). Functional reorganisation of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. *Experimental Brain Research, 130*, 238–243.
- Penny, W., & Henson, R. (2007). Analysis of Variance (Chapter 13). In K. Friston, J. Ashburner, S. Kiebel, T. Nichols, & W. Penny (Eds.), *Statistical Parametric Mapping: The analysis of functional brain images* (pp. 166–177). Amsterdam: Academic Press.
- Pilgramm, S., Lorey, B., Stark, R., Munzert, J., Vaitl, D., & Zentgraf, K. (2010). Differential activation of the lateral premotor cortex during action observation. *BMC Neuroscience, 11*, 89.
- Pinto, J., & Shiffrar, M. (2009). The visual perception of human and animal motion in point-light displays. *Social Neuroscience, 4*, 332–346.
- Pobric, G., & Hamilton, A. F. d. C. (2006). Action understanding requires the left inferior frontal cortex. *Current Biology, 16*, 524–529.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology, 9*, 129–154.
- Prinz, W. (2006). What re-enactment earns to us. *Cortex, 42*, 515–517.
- Radlo, S. J., Janelle, C. M., Barba, D. A., & Frehlich, S. G. (2001). Perceptual decision making for baseball pitch recognition: using P300 latency and amplitude to index attentional processing. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 72*, 22–31.

- Ramnani, N. (2006). The primate cortico-cerebellar system: anatomy and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 511–522.
- Rao, S. M., Bobholz, J. A., Hammeke, T. A., Rosen, A. C., Woodley, S. J., Cunningham, J. M., Cox, R. W., Stein, E. A., & Binder, J. R. (1997). Functional MRI evidence for sub-cortical participation in conceptual reasoning skills. *Neuroreport*, 8, 1987–1993.
- Reed, C. L., & Farah, M. J. (1995). The psychological reality of the body schema: a test with normal participants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 334–343.
- Rijntjes, M., Buechel, C., Kiebel, S., & Weiller, C. (1999). Multiple somatotopic representations in the human cerebellum. *Neuroreport*, 10, 3653–3658.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The Mirror-Neuron System. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–192.
- Rizzolatti, G., & Fabbri-Destro, M. (2008). The mirror system and its role in social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, 18, 179–184.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131–141.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2002). Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 12, 149–154.
- Rizzolatti, G., & Luppino, G. (2001). The cortical motor system. *Neuron*, 31, 889–901.
- Roca, A., Ford, P. R., McRobert, A. P., & Mark Williams, A. (2011). Identifying the processes underpinning anticipation and decision-making in a dynamic time-constrained task. *Cognitive Processing*, 12, 301–310.
- Rosalie, S. M., & Müller, S. (2012). A model for the transfer of perceptual-motor skill learning in human behaviors. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83, 413–421.
- Runeson, S., & Frykholm, G. (1983). Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person-and-action perception: Expectation, gender recognition, and deceptive intention. *Journal of Experimental Psychology*, 112, 585–615.
- Sack, A. T. (2009). Parietal cortex and spatial cognition. *Behavioural Brain Research*, 202, 153–161.
- Savelsbergh, G. J. P., Williams, A. M., van der Kamp, J., & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *Journal of Sports Sciences*, 20, 279–287.
- Schippers, M. B., & Keysers, C. (2011). Mapping the flow of information within the putative mirror neuron system during gesture observation. *NeuroImage*, 57, 37–44.
- Schlaug, G. (2001). The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 281–299.
- Schlösser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., Rusinek, H., Saarimaki, A., Stevenson, J., Dewey, S. L., & Brodie, J. D. (1998). Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 64, 492–498.
- Schmahmann, J. D., Macmore, J., & Vangel, M. (2009). Cerebellar stroke without motor deficit: clinical evidence for motor and non-motor domains within the human cerebellum. *Neuroscience*, 162, 852–861.

- Schorer, J. (2007). *Höchstleistung im Handballtor Höchstleistung im Handballtor: Eine Studie zur Identifikation, den Mechanismen und der Entwicklung senso-motorischer Expertise* (Dissertation). Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg.
- Schorer, J., Rienhoff, R., Fischer, L., & Baker, J. (2013). Foveal and peripheral fields of vision influences perceptual skill in anticipating opponents' attacking position in volleyball. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, *38*, 185–192.
- Schubotz, R. I. (2007). Prediction of external events with our motor system: towards a new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 211–218.
- Schubotz, R. I., & Cramon, D. Y. von. (2003). Functional-anatomical concepts of human premotor cortex: evidence from fMRI and PET studies. *NeuroImage*, *20*, 120–131.
- Schubotz, R. I., Sakreida, K., Tittgemeyer, M., & Cramon, D. Y. von. (2004). Motor areas beyond motor performance: deficits in serial prediction following ventrolateral premotor lesions. *Neuropsychology*, *18*, 638–645.
- Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2007). Perceptual resonance: action-induced modulation of perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 349–355.
- Serrien, D. J., & Wiesendanger, M. (1999). Grip-load force coordination in cerebellar patients. *Experimental Brain Research*, *128*, 76–80.
- Shim, J., Carlton, L. G., Chow, J. W., & Chae, W.-S. (2005). The use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players. *Journal of Motor Behavior*, *37*, 164–175.
- Shmuelof, L., & Zohary, E. (2007). Watching others' actions: mirror representations in the parietal cortex. *The Neuroscientist*, *13*, 667–672.
- Simon, H. A., & Chase, W. G. (1973). Skill in Chess. *American Scientist*, *61*, 394–403.
- Simon, O., Kherif, F., Flandin, G., Poline, J.-B., Rivière, D., Mangin, J.-F., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Automated clustering and functional geometry of human parieto-frontal networks for language, space, and number. *NeuroImage*, *23*, 1192–1202.
- Singer, R. N., Cauraugh, J. H., Chen, D., & Steinberg, G. M. (1996). Visual search, anticipation, and reactive comparisons between highly-skilled and beginning tennis players. *Journal of Applied Sport Psychology*, *8*, 9–26.
- Smeeton, N. J., Ward, P., & Williams, A. M. (2004). Do pattern recognition skills transfer across sports? A preliminary analysis. *Journal of Sports Sciences*, *22*, 205–213.
- Smeeton, N. J., Williams, A. M., Hodges, N. J., & Ward, P. (2005). The relative effectiveness of various instructional approaches in developing anticipation skill. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *11*, 98–110.
- Smith, S. M., Jenkinson, M., Woolrich, M. W., Beckmann, C. F., Behrens, T. E. J., Johansen-Berg, H., Bannister, P. R., Luca, M. de, Drobnjak, I., Flitney, D. E., Niazy, R. K., Saunders, J., Vickers, J., Zhang, Y., Stefano, N. de, Brady, J. M., & Matthews, P. M. (2004). Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. *NeuroImage*, *23*, 208–219.
- Sokolov, A., Gharabaghi, A., Tatagiba, M. S., & Pavlova, M. (2010). Cerebellar engagement in an action observation network. *Cerebral Cortex*, *20*, 486–491.
- Stadler, W., Ott, D. V. M., Springer, A., Schubotz, R. I., Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2012). Repetitive TMS suggests a role of the human dorsal premotor cortex in action prediction. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 20.

- Stadler, W., Schubotz, R. I., Cramon, D. Y. von, Springer, A., Graf, M., & Prinz, W. (2011). Predicting and memorizing observed action: differential premotor cortex involvement. *Human Brain Mapping, 32*, 677–687.
- Stanley, J., Gowen, E., & Miall, R. C. (2010). How instructions modify perception: an fMRI study investigating brain areas involved in attributing human agency. *NeuroImage, 52*, 389–400.
- Starkes, J. L. (2000). The road to expertise: Is practice the only determinant? *International Journal of Sport Psychology, 31*, 431–451.
- Starkes, J. L., Deakin, J. M., Allard, F., Hodges, N. J., & Hayes, A. (1996). Deliberate practice in sports: What is it anyway? In K. A. Ericsson (Ed.), *The road to excellence. The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games* (pp. 81–106). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Starkes, J. L., Edwards, P., Dissanayake, P., & Dunn, T. (1995). A new technology and field test of advance cue usage in volleyball. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 66*, 162–167.
- Sternberg, R. J., & Wagner, R. K. (1999). *Readings in cognitive psychology*. Fort Worth, TX: Harcourt Brace College Publishers.
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2009). Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage, 44*, 489–501.
- Strick, P. L., Dum, R. P., & Fiez, J. A. (2009). Cerebellum and nonmotor function. *Annual Review of Neuroscience, 32*, 413–434.
- Suchan, B., Melde, C., Herzog, H., Hömberg, V., & Seitz, R. J. (2008). Activation differences in observation of hand movements for imitation or velocity judgement. *Behavioural Brain Research, 188*, 78–83.
- Thickbroom, G. W., Byrnes, M. L., & Mastaglia, F. L. (2003). Dual representation of the hand in the cerebellum: activation with voluntary and passive finger movement. *NeuroImage, 18*, 670–674.
- Travassos, B., Araújo, D., Davids, K., O'Hara, K., Leitão, J., & Cortinhas, A. (2013). Expertise effects on decision-making in sport are constrained by requisite response behaviours – A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise, 14*, 211–219.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: a framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision, 2*, 371–387.
- Troje, N. F. (2008). Biological motion perception. In A. I. Basbaum & R. H. Masland (Eds.), *The senses: a comprehensive reference. Vision II* (2nd ed., pp. 231–238). Amsterdam: Elsevier.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012). What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *British Journal of Sports Medicine, 46*, 555–561.
- Tunik, E., Rice, N. J., Hamilton, A., & Grafton, S. T. (2007). Beyond grasping: representation of action in human anterior intraparietal sulcus. *NeuroImage, 36*, 77–86.
- Turella, L., Wurm, M. F., Tucciarelli, R., & Lingnau, A. (2013). Expertise in action observation: recent neuroimaging findings and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 637.

- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B., & Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *NeuroImage*, *15*, 273–289.
- Umiltà, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing. a neurophysiological study. *Neuron*, *31*, 155–165.
- Uozumi, T., Tamagawa, A., Hashimoto, T., & Tsuji, S. (2004). Motor hand representation in cortical area 44. *Neurology*, *62*, 757–761.
- Urgesi, C., Calvo-Merino, B., Haggard, P., & Aglioti, S. M. (2007). Transcranial magnetic stimulation reveals two cortical pathways for visual body processing. *Journal of Neuroscience*, *27*, 8023–8030.
- Urgesi, C., Maieron, M., Avenanti, A., Tidoni, E., Fabbro, F., & Aglioti, S. M. (2010). Simulating the future of actions in the human corticospinal system. *Cerebral Cortex*, *20*, 2511–2521.
- Vaina, L. M., Solomon, J., Chowdhury, S., Sinha, P., & Belliveau, J. W. (2001). Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*, 11656–11661.
- Vallesi, A., McIntosh, A. R., Crescentini, C., & Stuss, D. T. (2012). fMRI investigation of speed-accuracy strategy switching. *Human Brain Mapping*, *33*, 1677–1688.
- van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis. *NeuroImage*, *48*, 564–584.
- Ward, P., Farrow, D., Harris, K. R., Williams, A. M., Eccles, D. W., & Ericsson, K. A. (2008). Training perceptual-cognitive skills: Can sport psychology research inform military decision training? *Military Psychology*, *20*, 71–102.
- Ward, P., Hodges, N. J., Williams, A. M., & Starkes, J. L. (2004). Deliberate practice and expert performance: Defining the path to excellence. In A. M. Williams & N. J. Hodges (Eds.), *Skill acquisition in sport. Research, theory and practice* (pp. 231–258). London, New York: Routledge.
- Ward, P., Williams, A. M., & Bennett, S. J. (2002). Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *73*, 107–112.
- Watanabe, O., & Kikuchi, M. (2006). Hierarchical integration of individual motions in locally paired-dot stimuli. *Vision Research*, *46*, 82–90.
- Welford, A. T. (1968). *Fundamentals of skill*. London: Methuen.
- Williams, A. M., & Davids, K. (1998). Visual search strategy, selective attention, and expertise in soccer. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *69*, 111–128.
- Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L., & Williams, J. G. (1994). Visual search strategies in experienced and inexperienced soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *65*, 127–135.
- Williams, A. M., Davids, K., & Williams, J. G. (1999). *Visual perception and action in sport*. London: E.& F.N. Spon.
- Williams, A. M., & Ericsson, K. A. (2005). Perceptual-cognitive expertise in sport: Some considerations when applying the expert performance approach. *Human Movement Science*, *24*, 283–307.

- Williams, A. M., Ford, P. R., Eccles, D. W., & Ward, P. (2011). Perceptual-cognitive expertise in sport and its acquisition: implications for applied cognitive psychology. *Applied Cognitive Psychology, 25*, 432–442.
- Williams, A. M., & Hodges, N. J. (2004). *Skill acquisition in sport: Research, theory and practice*. London, New York: Routledge.
- Williams, A. M., Hodges, N. J., North, J. S., & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception, 35*, 317–332.
- Williams, A. M., Huys, R., Cañal-Bruland, R., & Hagemann, N. (2009). The dynamical information underpinning anticipation skill. *Human Movement Science, 28*, 362–370.
- Williams, A. M., & Ward, P. (2007). Anticipation and decision making: Exploring new horizons. In G. Tenenbaum & R. C. Eklund (Eds.), *Handbook of sport psychology* (3rd ed., pp. 203–223). Hoboken, N.J: Wiley.
- Williams, A. M., Ward, P., & Chapman, C. (2003). Training perceptual skill in field hockey: Is there transfer from the laboratory to the field? *Research Quarterly for Exercise and Sport, 74*, 98–103.
- Williams, A. M., Ward, P., Knowles, J. M., & Smeeton, N. J. (2002). Anticipation skill in a real-world task: measurement, training, and transfer in tennis. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 8*, 259–270.
- Williams, A. M., Ward, P., & Smeeton, N. J. (2004). Perceptual and cognitive expertise in sport: Implications for skill acquisition and performance enhancement. In A. M. Williams & N. J. Hodges (Eds.), *Skill acquisition in sport. Research, theory and practice* (pp. 328–347). London, New York: Routledge.
- Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (1999). *Physiology of sport and exercise* (2nd ed.). Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Winstein, C. J., Grafton, S. T., Pohl, P. S., & Angeles, L. (1997). Motor task difficulty and brain activity: investigation of goal-directed reciprocal aiming using positron emission tomography. *Journal of Neurophysiology, 77*, 1581–1594.
- Wolfensteller, U. (2009). Juggling with the brain - thought and action in the human motor system. *Progress in Brain Research, 174*, 289–301.
- Wolfensteller, U., Schubotz, R. I., & Cramon, D. Y. von. (2007). Understanding non-biological dynamics with your own premotor system. *NeuroImage, 36*, 33–43.
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in Cognitive Sciences, 1*, 209–216.
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series B: Biological Sciences, 358*, 593–602.
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology, 11*, 729–732.
- Wolpert, D. M., Goodbody, S. J., & Husain, M. (1998a). Maintaining internal representations: the role of the human superior parietal lobe. *Nature Neuroscience, 1*, 529–533.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998b). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences, 2*, 338–347.

- Worsley, K. (2007). Random Field Theory (Chapter 18). In K. Friston, J. Ashburner, S. Kiebel, T. Nichols, & W. Penny (Eds.), *Statistical Parametric Mapping: The analysis of functional brain images* (pp. 232–236). Amsterdam: Academic Press.
- Wright, M. J., Bishop, D. T., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2010). Functional MRI reveals expert-novice differences during sport-related anticipation. *Neuroreport*, *21*, 94–98.
- Wright, M. J., Bishop, D. T., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2011). Cortical fMRI activation to opponents' body kinematics in sport-related anticipation: Expert-novice differences with normal and point-light video. *Neuroscience Letters*, *500*, 216–221.
- Wright, M. J., & Jackson, R. C. (2007). Brain regions concerned with perceptual skills in tennis: an fMRI study. *International Journal of Psychophysiology*, *63*, 214–220.
- Wu, Y., Zeng, Y., Zhang, L., Wang, S., Wang, D., Tan, X., Zhu, X., & Zhang, J. (2013). The role of visual perception in action anticipation in basketball athletes. *Neuroscience*, *237*, 29–41.
- Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*, 585–596.
- Zentgraf, K., Green, N., Munzert, J., Schack, T., Tenenbaum, G., Vickers, J. N., Weigelt, M., Wolfensteller, U., & Heekeren, H. R. (2009). How are actions physically implemented? *Progress in Brain Research*, *174*, 303–318.
- Zentgraf, K., Munzert, J., Bischoff, M., & Newman-Norlund, R. D. (2011). Simulation during observation of human actions-theories, empirical studies, applications. *Vision Research*, *51*, 827–835.
- Zentgraf, K., Stark, R., Reiser, M., Künzell, S., Schienle, A., Kirsch, P., Walter, B., Vaitl, D., & Munzert, J. (2005). Differential activation of pre-SMA and SMA proper during action observation: effects of instructions. *NeuroImage*, *26*, 662–672.

Anhang

Anhang A**Experiment 1 und Experiment 2**

Informationsblatt und Einverständniserklärung zur fMRT-Untersuchung
Edinburgh Inventory of Handedness (Oldfield, 1971)

Anhang B**Experiment 1**

Studienablauf, Datenschutzinformationen und Einverständniserklärung
Fragebogen zu demographischen Daten sowie zur Tennisexpertise

Anhang C**Experiment 2**

Studienablauf, Datenschutzinformationen und Einverständniserklärung
Fragebogen zu demographischen Daten sowie zur Tennis- und
Volleyballexpertise

2008-05-09



Bevor Sie das Formular ausfüllen:
 Lesen Sie bitte zuerst **ohne anzukreuzen** alle Fragen des Formulars durch. Sollten Sie bei einer Frage mit Ja antworten müssen, können Sie leider nicht an der Untersuchung teilnehmen. Geben Sie dann bitte das nicht ausgefüllte Formular dem Versuchsleiter zurück. Sie werden nicht nach Gründen gefragt und es entstehen Ihnen keine Nachteile. Sollten Sie alle Fragen mit Nein beantworten können, füllen Sie bitte das Formular aus.

Bitte kreuzen Sie Zutreffendes an!

- | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja | Sind Sie an Herz, Lunge oder Gehirn operiert worden? |
| <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja | Leiden Sie unter Epilepsie? |
| <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja | Besteht eine Schwangerschaft? |

<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Haben Sie ein/eine(n) ...
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Gefäßclip
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Herzschrillmacher
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Nervenstimulator
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Rückenmarkstimulator
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	implantierten Defibrillator
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	elektronisches Implantat
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	künstliches Gelenk
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	von außen einstellbares Implantat
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	hydraulisches Schwellkörperimplantat
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Prothese oder Implantat (z.B. Glasauge)
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Cochlear Implantat oder implantiertes Hörgerät
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	anderes Implantat (z. B. künstlichen Darmausgang, künstliche Herzklappen)

<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Haben Sie ein/eine(n) ...
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Osteosyntheseplatte
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Intrauterinpressar
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Insulin- oder Infusionspumpe
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Implantierte Infusionspumpe
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Metallsplitter oder metallische Fremdkörper
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	inneren oder äußeren metallische Gegenstand
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	kosmetische Augenlidmanipulation, Permanent Make-up
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Tätowierung am Kopf- oder Halsbereich
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Nikotin- oder Medikamentenpflaster
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Zahnspange (-draht)
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	magnetisch befestigtes Zahnimplantat
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja	Spirale

Vor der Messung und dem Betreten des Untersuchungsraums

Entfernen Sie alle metallischen und nicht MRT-geeigneten Gegenstände bevor Sie den Untersuchungsraum betreten: **herausnehmbare Zahnprothesen, Kontaktlinsen, Hörgeräte, Prothesen**, Handys, Brillen, Haarnadeln, Schmuck (auch Piercings), Uhren, Sicherheitsnadeln, Geldbeutel, Bank- und Kreditkarten, magnetisch kodierte Karten, Münzen, Kugelschreiber, Taschenmesser, metallische Formbügel in Büstenhaltern, Schuhe mit Stahlkappen und Werkzeuge.

Für Schäden, die durch Nichtbeachtung dieser Sicherheitshinweise auftreten, wird keine Haftung übernommen!

Wichtig

Ich bin darauf aufmerksam gemacht worden, dass keine medizinische Diagnostik durchgeführt wird und die Hirnbilder auch nicht für medizinische Diagnostik benutzt werden können. Sollten trotzdem Auffälligkeiten in den Bildern erkannt werden, bin ich damit einverstanden, dass diese mir mitgeteilt werden.

Ich bestätige, dass die obigen Angaben richtig sind. Ich habe den Inhalt dieses Informationsblattes gelesen und verstanden und hatte die Möglichkeit Fragen dazu zu stellen. **Ich habe das Recht die Teilnahme an der Untersuchung zu jeder Zeit und ohne Angabe von Gründen abzubrechen. Es entstehen mir dadurch keine Nachteile.**

Persönliche Daten:

Name, Vorname	
Geburtsdatum	
Gewicht	

Gießen, den _____
 Ort, Datum

 Unterschrift Proband(in)

 Unterschrift Versuchsleiter(in)

Probandencode: _____

Edinburgh Inventory of Handedness

Bitte dokumentieren Sie Ihre Handpräferenz für die unten aufgelisteten Handlungen oder Objekte durch ein „+“ in dem dafür vorgesehenen Kästchen. Ist die Bevorzugung einer Hand bei einer Tätigkeit/einem Objekt so stark, dass Sie niemals versuchen würden, die andere dafür zu verwenden, dann fügen Sie ein „++“ ein. Sind Sie sich bei einer Antwort unentschieden, dann fügen Sie in beiden Kästchen ein „+“ ein.

Für die Ausführung mancher Tätigkeiten oder die Benutzung einiger Objekte sind zwei Hände notwendig. In diesem Fall ist in Klammern angegeben, welcher Teil der Handlung genau gemeint ist.

Bitte beantworten Sie alle Fragen und lassen Sie nur dann eine Lücke, wenn Sie mit der Tätigkeit/dem Objekt überhaupt keine Erfahrung haben.

		links	rechts
1	Schreiben		
2	Zeichnen		
3	Werfen		
4	Schere		
5	Zahnbürste		
6	Messer (ohne Gabel)		
7	Löffel		
8	Besen (obere Hand)		
9	Ein Streichholz anzünden		
10	Eine Kiste öffnen (Deckel)		

Beobachtung von Tennisbewegungen

Informationsblatt und Einverständniserklärung

Liebe/r Proband/in,

die Abteilung Sportpsychologie und Bewegungswissenschaft (Prof. Dr. Jörn Munzert) führt ein neurophysiologisches Forschungsprojekt zur Beobachtung und Vorstellung von Tennisbewegungen durch.

Die Untersuchung besteht aus einem ca. 75 minütigen Termin. In dieser Untersuchung erfolgt eine Messung mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Hierbei werden Bilder Ihres Gehirns während der Beobachtung von Tennisbewegungen angefertigt. Mittels dieser Technik gelingt es, die neuronalen Strukturen zu identifizieren, die während der Beobachtung aktiv sind. Besonders aktive Strukturen benötigen viel Blut, um die Nervenzellen ausreichend mit Energie und Sauerstoff zu versorgen. Aufgrund seines Eisengehaltes hat das Blut magnetische Eigenschaften. Der Scanner erzeugt ein starkes Magnetfeld, wodurch der Blutfluss während einer Aufgabe gemessen werden kann.

Aufgrund dieses starken Magnetfeldes (1.5 Tesla) ergeben sich Ausschlusskriterien. Beispielsweise dürfen Sie keine Metallteile im oder am Körper tragen, die Sie nicht ablegen können, Sie dürfen nicht am Herz oder Gehirn operiert worden sein, auch Tätowierungen im Kopf- und Halsbereich schließen eine Teilnahme an der Studie aus. Während der Messung findet die Kommunikation zwischen Versuchsleiter und Proband/in über Mikrofon und Lautsprecher statt. Diese Daten werden nicht aufgezeichnet. Um sicher zu gehen, dass Sie wach bleiben und während der Vorstellungsphase die Augen schließen, werden ihre Augen während der Untersuchung aufgenommen. Diese Daten werden aufgezeichnet.

Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist freiwillig und kann jederzeit von Ihnen abgebrochen werden, ohne Angabe von Gründen und ohne, dass daraus für Sie negative Konsequenzen entstehen. In diesem Falle werden Ihre Daten komplett vernichtet. Auch nach vollständig abgeschlossener Datenerhebung können auf Ihr Verlangen hin alle von Ihnen aufgezeichneten Daten vernichtet werden.

Für Ihre Teilnahme an dem Experiment erhalten Sie eine Entschädigung in Form von 2 Versuchspersonenstunden oder Bargeld (15 €). Wird die Untersuchung vor Beendigung abgebrochen, so erhalten Sie eine anteilige Aufwandsentschädigung in Abhängigkeit der bereits investierten Zeit.

Mit Ihrer Einverständniserklärung bestätigen Sie,

1. dass Sie über die bevorstehende Untersuchung informiert wurden
2. dass Sie auf die Freiwilligkeit der Teilnahme hingewiesen wurden
3. dass Sie den Weisungen der Versuchsleiter Folge leisten
4. dass Sie zu allen vereinbarten Terminen pünktlich erscheinen werden

Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung werden Ihre Daten aus den Fragebögen sowie Ihre Hirnaktivität aufgezeichnet. Alle Daten werden unter Einhaltung des Datenschutzgesetzes erhoben und dementsprechend vertraulich behandelt. Eine Zuordnung der erhobenen Daten und den dazugehörigen Versuchspersonen ist ausschließlich durch den Versuchsleiter möglich.

Die Daten werden als Gruppenergebnis ausgewertet. Hier gilt, dass nicht erkennbar ist und auch nicht rückgeschlossen werden kann, wer an der Studie teilgenommen hat. Alle gesetzlichen Bestimmungen und ethischen Richtlinien, die für wissenschaftliche Untersuchungen verbindlich sind, werden eingehalten.

(Vor- und Nachname in Druckbuchstaben)

Gießen,

Datum, Unterschrift

Demographische Daten und Tenniserfahrung

Probandencode: _____ - _____ - _____

Bitte füllen Sie die folgenden Angaben zu Ihrer Person aus.

Alter: _____ Jahre

Schulabschluss: _____

Studienfach: _____

Berufstätigkeit: _____

Die folgenden Fragen beziehen sich auf Ihre Erfahrung in Rückschlagsportarten im Allgemeinen und Tennis im Speziellen.

1. Folgende Sportarten habe ich in den letzten fünf Jahren ausgeübt:

	nie	selten	manchmal	wöchentlich	öfter
Tennis:	<input type="checkbox"/>				
Tischtennis:	<input type="checkbox"/>				
Badminton:	<input type="checkbox"/>				
Squash:	<input type="checkbox"/>				

2. Folgende Sportarten habe ich im Verein gespielt:

	ja	nein	
Tennis:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	wenn ja, wie lange: _____ Jahre
Tischtennis:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	wenn ja, wie lange: _____ Jahre
Badminton:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	wenn ja, wie lange: _____ Jahre
Squash:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	wenn ja, wie lange: _____ Jahre

3. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt spiele ich

nie selten manchmal wöchentlich öfter
 Tennis.

3.1 Falls Sie im Verein Tennis spielen: Wie häufig trainieren Sie in der Woche?

1x 2 x 3 x 4 x 5 x 6 x 7 x pro Woche

3.2 Falls Sie im Verein Tennis spielen: Wie viele Spiele haben Sie in Ihrer Tenniskarriere bereits bestritten? Circa _____ Spiele.

4. Ich würde meinen Tennis Fähigkeiten folgende Note geben: _____ (Schulnote).

Beobachtung von Tennis- und Volleyballbewegungen

Informationsblatt und Einverständniserklärung

Liebe/r Proband/in,

die Abteilung Sportpsychologie und Bewegungswissenschaft (Prof. Dr. Jörn Munzert) führt ein neurophysiologisches Forschungsprojekt zur Beobachtung von Tennis- und Volleyballbewegungen durch.

Die Untersuchung besteht aus einem Termin mit einer Dauer von ca. 90 min. Während dieser Untersuchung erfolgt eine Messung mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Hierbei werden Bilder Ihres Gehirns während der Beobachtung von Tennis- und Volleyballbewegungen angefertigt. Mittels dieser Technik gelingt es, die neuronalen Strukturen zu identifizieren, die während der Beobachtung aktiv sind. Besonders aktive Strukturen benötigen viel Blut, um die Nervenzellen ausreichend mit Energie und Sauerstoff zu versorgen. Aufgrund seines Eisengehaltes hat das Blut magnetische Eigenschaften. Der Scanner erzeugt ein starkes Magnetfeld, wodurch der Blutfluss während einer Aufgabe gemessen werden kann.

Aufgrund dieses starken Magnetfeldes (1.5 Tesla) ergeben sich Ausschlusskriterien. Beispielsweise dürfen Sie keine Metallteile im oder am Körper tragen, die Sie nicht ablegen können, Sie dürfen nicht am Herz oder Gehirn operiert worden sein, auch Tätowierungen im Kopf- und Halsbereich schließen eine Teilnahme an der Studie aus. Während der Messung findet die Kommunikation zwischen Versuchsleiter und Proband/in über Mikrofon und Lautsprecher statt. Diese Daten werden nicht aufgezeichnet. Um sicher zu gehen, dass Sie wach bleiben, werden ihre Augen während der Untersuchung aufgenommen. Diese Daten werden aufgezeichnet.

Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist freiwillig und kann jederzeit von Ihnen abgebrochen werden, ohne Angabe von Gründen und ohne, dass daraus für Sie negative Konsequenzen entstehen. Für Ihre Teilnahme an dem Experiment erhalten Sie eine Entschädigung in Form von 1.5 Versuchspersonenstunden oder Bargeld (15 €). Wird die Untersuchung vor Beendigung abgebrochen, so erhalten Sie eine anteilige Aufwandsentschädigung in Abhängigkeit der bereits investierten Zeit.

Mit Ihrer Einverständniserklärung bestätigen Sie,

1. dass Sie über die bevorstehende Untersuchung informiert wurden
2. dass Sie auf die Freiwilligkeit der Teilnahme hingewiesen wurden
3. dass Sie den Weisungen der Versuchsleiter Folge leisten
4. dass Sie zu allen vereinbarten Terminen pünktlich erscheinen werden

Datenschutzerklärung

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten (aus Fragebögen sowie die aufgezeichnete Hirnaktivität) unter Einhaltung des Hessischen Datenschutzgesetzes erhoben, gespeichert und verarbeitet werden. Ich bin damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung der Studie mindestens 10 Jahre aufbewahrt werden. Ich bin darüber informiert, dass alle Untersucher/innen der Verschwiegenheitsverpflichtung nach §203 StGB unterliegen und die Speicherung und Auswertung meiner studienbezogenen Daten nach gesetzlichen Bestimmungen gemäß §33 Hessisches Datenschutzgesetz in anonymisierter oder pseudonymisierter Form erfolgt. Ich bin darüber aufgeklärt worden, dass ich nach Widerruf meiner Einwilligung zur Studienteilnahme das Recht habe, Einsicht in meine bis dahin gespeicherten Daten zu verlangen und deren Löschung zu beantragen, sofern keine anderweitigen gesetzlichen Vorgaben bestehen. Ich bin über die Behandlung der erhobenen Daten und über die Möglichkeit, dass autorisierte Personen der Studie und der zuständigen Ethikkommission unter Wahrung der Vertraulichkeit in Originalbefunde Einsicht nehmen, informiert worden und erkläre mich damit einverstanden.

Die hirnphysiologischen Daten werden als Gruppenergebnis ausgewertet. Hier gilt, dass nicht erkennbar ist und auch nicht rückgeschlossen werden kann, wer an der Studie teilgenommen hat. Alle gesetzlichen Bestimmungen und ethischen Richtlinien, die für wissenschaftliche Untersuchungen verbindlich sind, werden eingehalten.

(Vor- und Nachname in Druckbuchstaben)

Gießen,

Datum, Unterschrift

Datum, Unterschrift des Untersuchenden

4. Falls Sie im Verein **Tennis** spielen...

4.1 ...Wie häufig trainieren Sie in der Woche?

1x 2 x 3 x 4 x 5 x 6 x 7 x
 pro Woche

4.2 ...Wie viele Spiele haben Sie in Ihrer **Tenniskarriere** bereits bestritten?

Circa _____ Spiele.

4.3 ...Was war das höchste Spielniveau das Sie bisher in Ihrer **Tenniskarriere** gespielt haben (z.B. 1.Bundesliga)?

5. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt spiele ich

Nie selten manchmal wöchentlich öfter **Volleyball.**

6. Falls Sie im Verein **Volleyball** spielen...

6.1 ...Wie häufig trainieren Sie in der Woche?

1x 2 x 3 x 4 x 5 x 6 x 7 x
 pro Woche

6.2 Wie viele Spiele haben Sie in Ihrer **Volleyballkarriere** bereits bestritten?

Circa _____ Spiele.

6.3 Was war das höchste Spielniveau das Sie bisher in Ihrer **Volleyballkarriere** gespielt haben?

6.4 Welche Position spielen Sie derzeit?

Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

(Nils Henning Balser)

