

Kernspintomographische Untersuchung zur Bedeutung von Rückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium

(Dr. rer. nat.)

genehmigt durch die Fakultät für Naturwissenschaften

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von Dipl.-Neurowiss. Christin Kohrs

geb. am 01.03.1984 in Beckendorf-Neindorf

Gutachter: Prof. Dr. Frank W. Ohl

Prof. Dr. Harald C. Traue

eingereicht am: 23. September 2014

verteidigt am: 16. April 2015

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand am Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg während meiner Arbeit im Speziallabor für Nicht-Invasive Bildgebung unter Betreuung von Professor Dr. Henning Scheich und Dr. André Brechmann. Professor Dr. Henning Scheich danke ich für seine Ideen und Ratschläge bei der Planung der Studien und seine inspirative Begeisterung für die Wissenschaft. An dieser Stelle danke ich auch Professor Dr. Frank Ohl für die kurzfristige Übernahme der Betreuung und die Bereitschaft zusätzliche Zeit zu investieren. Mein besonderer Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die stetige Unterstützung während der Erstellung der Arbeit gilt Dr. André Brechmann.

Ebenso danke ich allen Kollegen des Speziallabors für Nicht-Invasive Bildgebung für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Für die Einarbeitung in das Thema der Arbeit und in die Methode der fMRT danke ich Dr. Nicole Angenstein. Mein Dank gilt Dr. Anja Bethmann und Antje Schasse für die vielen hilfreichen Ratschläge bei der statistischen Analyse der fMRT-Daten und Monika Dobrowolny, Andreas Fügner und Jörg Stadler für die Datenerhebung der fMRT-Daten. Für die gemeinsame Einarbeitung in die Themen des SFB/TRR 62, die Weitergabe ihrer wissenschaftlichen Erfahrungen und die Korrektur so mancher Texte möchte ich besonders Dr. Susann Wolff danken.

Die Zusammenarbeit mit den Kollegen aus den verschiedenen technischen und psychologischen Teilprojekten des SFB/TRR 62 *Companion Technologie* hat die Arbeit an meiner Dissertation bereichert. Für den wissenschaftlichen Austausch danke ich allen Mitarbeitern, besonders den Doktoranden des SFB. Für den Aufbau und die Durchführung der Untersuchungen im SFB-Labor gilt mein Dank Andreas Meinecke und Sven Plate.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung, Ermunterungen und heimlichen Motivationstricks.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I Theoretischer und empirischer Hintergrund	3
1 Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext	4
1.1 Rückmeldungen in der Kommunikation	4
1.1.1 Erkenntnisse aus der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation	4
1.1.2 Zur Bedeutung von Systemrückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion	6
1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion	7
1.2.1 Definition der Systemresponsezeit	7
1.2.2 Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Systemresponsezeiten	8
1.2.3 Auswirkungen der Systemresponsezeiten	9
1.2.4 Richtlinien zu Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion	12
1.3 Psychologische Theorien zur Systemresponsezeit	14
1.3.1 Unterbrechung von Handlungsabläufen – Mandler (1964)	14
1.3.2 Wahrscheinlichkeitsmodell zur Beanspruchung durch Systemresponsezeiten – Holling (1989)	15
1.4 Relevanz des Themas und Motivation der neurowissenschaftlichen Studien	16
1.4.1 Systemresponsezeiten in der heutigen Mensch-Computer-Interaktionsforschung	16
1.4.2 Neurowissenschaftliche Studien	18
1.4.3 Experimente	20
2 Methodische Grundlagen	22
2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung	22
2.1.1 Prinzip der Magnetresonanztomographie	22
2.1.2 Prinzip der funktionellen Magnetresonanztomographie	26
2.2 Datenerhebung fMRT	28
2.3 Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten	29

2.4 Analyse der fMRT-Daten 30
2.5 Messung der Tastendruckdynamik 31
2.6 Messung des Pupillendurchmessers 32
2.7 Allgemeines Stimulusdesign 32
2.8 Probanden 33

II Experimente 34

3 Studie I: Modalität und Informationsgehalt von Rückmeldungen 35

3.1 Einleitung 35
3.2 Hypothesen 37
3.3 Material und Methode 37
 3.3.1 Probanden 37
 3.3.2 Stimuli und Aufgabe 38
 3.3.3 Datenerhebung 38
 3.3.4 Datenvorverarbeitung 39
 3.3.5 Datenanalyse 39
3.4 Ergebnisse 40
 3.4.1 Verhaltensdaten 40
 3.4.2 fMRT-Daten 41
3.5 Diskussion 43
 3.5.1 Allgemeine Diskussion 43
 3.5.2 Hirnareale 45

4 Studie II: Verzögerungen in der Präsentation von Rückmeldungen 51

4.1 Vorstudie: Schwellenbestimmung einer wahrnehmbaren Verzögerung 51
 4.1.1 Einleitung 51
 4.1.2 Hypothesen 52
 4.1.3 Probanden 52
 4.1.4 Stimulusdesign 52
 4.1.5 Datenerhebung 53
 4.1.6 Datenanalyse 53
 4.1.7 Ergebnisse 53
 4.1.8 Diskussion 55
4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen 55
 4.2.1 Einleitung 55
 4.2.2 Hypothesen 56

4.2.3	Probanden	56
4.2.4	Stimulusdesign	57
4.2.5	Datenerhebung	58
4.2.6	Datenvorverarbeitung	58
4.2.7	Datenanalyse	58
4.2.8	Ergebnisse	61
4.2.9	Diskussion	71
4.2.9.1	allgemeine Diskussion	71
4.2.9.2	Hirnareale	72
5	Studie III: Kontrollexperimente zum Einfluss der Nutzererwartung	78
5.1	Einleitung	78
5.2	Hypothesen	79
5.3	Material und Methode	79
5.3.1	Probanden	79
5.3.2	Stimuli und Aufgabe	80
5.3.3	Datenerhebung	80
5.3.4	Datenvorverarbeitung fMRT	80
5.3.5	Datenanalyse fMRT	80
5.4	Ergebnisse	81
5.5	Diskussion	84
6	Studie IV: Tastendruckdynamik während verzögerter Rückmeldungen	87
6.1	Einleitung	87
6.2	Hypothesen	89
6.3	Material und Methode	89
6.3.1	Probanden	89
6.3.2	Stimuli und Aufgabe	89
6.3.3	Datenerhebung der Tasterdaten	90
6.3.4	Datenvorverarbeitung der Tasterdaten	91
6.3.5	Datenanalyse	91
6.4	Ergebnisse	92
6.4.1	Reaktionszeiten	92
6.4.2	Tastendruckdynamik	93
6.5	Diskussion	95

III Allgemeine Diskussion	98
7 Modalität und Informationsgehalt der Rückmeldungen	99
7.1 Zusammenfassung	99
7.2 Auswirkungen auf die HCI	100
8 Verzögerungen der Systemantwort	102
8.1 Zusammenfassung	102
8.2 Auswirkungen auf die HCI	104
Anhang	106
A Fragebögen	106
A.1 Fragebogen Studie I	106
A.2 Fragebogen Studie II	107
A.3 Fragebogen Studie III: Kontrollexperiment 1	108
A.4 Fragebogen Studie III: Kontrollexperiment 2	109
A.5 Fragebogen Studie IV	110
B Tabellen	111
B.1 Studie II: Analyse der Regionen nach Altersgruppen	111
B.2 Studie II: Analyse der Probanden, die Verzögerungen nicht bemerkt haben	113
Abkürzungsverzeichnis	114
Abbildungsverzeichnis	117
Tabellenverzeichnis	118
Literaturverzeichnis	119

Einleitung

Für eine gelungene Kommunikation sind wechselseitige Rückmeldungen der Kommunikationspartner unerlässlich. Diese signalisieren dem Sender einer Information, dass sein Anliegen verstanden wurde und können die Zustimmung oder Ablehnung des Kommunikationspartners zum Ausdruck bringen. Hierbei können Rückmeldungen auf verschiedenen sensorischen Kanälen übertragen werden, sowohl verbal und paraverbal als auch über Gestik und Mimik. Diese Kommunikationsmuster finden sich nicht nur in Dialogen zwischen Menschen, sondern sind ebenso eine Voraussetzung für die erfolgreiche und zufriedenstellende Kommunikation mit technischen Systemen. Erst durch eine Rückmeldung des Systems an den Nutzer kann dieser sicher sein, dass das System seine Eingabe verarbeitet.

Die Kommunikation zwischen den Interaktionspartnern unterliegt dem Gestaltgesetz der Geschlossenheit (*principle of closure*, siehe Fußnote 1, Seite 5) (Clark, 1996; Jurafsky & Martin, 2008). Damit ein Dialog als Einheit wahrgenommen wird, muss die Rückmeldung des Systems als zeitlich passend (kontingent) empfunden werden. Sowohl aus der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation als auch aus der Mensch-Computer-Interaktion (HCI) sind Grenzwerte bekannt, die eingehalten werden müssen, damit es nicht zum Abbruch der Kommunikation kommt. Diese Grenzwerte einer Systemresponsezeit (folgend als SRZ abgekürzt) sind jedoch nicht statisch, sondern abhängig von äußeren Faktoren wie dem Inhalt der Kommunikation und von den individuellen Erwartungen des kommunizierenden Nutzers. Zahlreiche Alltagsbeispiele, vor allem im Umgang mit netzwerkbasierten und mobilen technischen Systemen belegen, dass sich verzögerte Systemantworten negativ auf die Nutzerzufriedenheit auswirken und bis heute ein ungelöstes Problem in der Kommunikation mit technischen Systemen darstellen.

Die vorliegende Arbeit wählt einen neurowissenschaftlichen Zugang zum Thema und hat zum Ziel neuronale Korrelate eines erfolgreichen Interaktionsverlaufs zu identifizieren und den Einfluss verzögerter Systemantworten auf die Hirnaktivität aufzuklären.

Der erste Teil der Arbeit gibt einen Überblick über den derzeitigen empirischen Wissensstand und die theoretischen Grundlagen des Themas. Einleitend werden im ersten Kapitel die Bedingungen einer erfolgreichen Mensch-zu-Mensch-Kommunikation beleuchtet, um anschließend anhand dieser Erkenntnisse Rückschlüsse auf die Mensch-Computer-Interaktion ziehen zu können. Nachfolgend liegt der Schwerpunkt des Kapitels auf der Bedeutung von Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion. Aus den Beobachtungen der HCI-

Forschung werden die Faktoren vorgestellt, die die Wahrnehmung der Systemresponsezeit beeinflussen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse früherer Verhaltensexperimente und psychophysiologischer Studien verdeutlicht den negativen Einfluss verzögerter Systemantworten auf das Nutzerverhalten und die Nutzerzufriedenheit. Basierend auf diesen Studien wurden in Industrie und Forschung Richtlinien zur Einhaltung von Systemresponsezeiten in der HCI aufgestellt, die ebenfalls in diesem Kapitel Erwähnung finden. Im Folgenden werden zwei psychologische Theorien vorgestellt, die Ansätze zur Erklärung des Nutzerverhaltens während verzögerter Systemantworten liefern und mit deren Hilfe das zukünftige Nutzerverhalten möglicherweise vorausgesagt werden kann. Vor allem die Theorie von Mandler (1964) ist für die vorliegende Arbeit von Bedeutung. Anschließend werden bekannte neurowissenschaftliche Studien vorgestellt, die den Ausgangspunkt zur experimentellen Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit bilden und mögliche neuronale Korrelate diskutiert. Abschließend werden im ersten Kapitel die Ziele der empirischen Studien der vorliegenden Arbeit und ihr experimenteller Ablauf skizziert. Das zweite Kapitel beschreibt die methodischen Grundlagen der vier empirischen Studien. Das Prinzip der Magnetresonanztomographie sowie die Methode der funktionellen Bildgebung werden eingehend erläutert. Weiterhin wird die Messung der Tastendruckdynamik und des Pupillendurchmessers beschrieben. Bevor sich im zweiten Teil der Arbeit die vier empirischen Studien anschließen, werden allgemeine studienübergreifende Designaspekte sowie das Vorgehen der Datenerhebung am 3-Tesla Scanner und die Routinen zur Auswertung der funktionellen Daten vorgestellt.

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit umfasst vier empirische Studien. Die erste Studie untersucht grundlegende Eigenschaften von Systemrückmeldungen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie. Der Einfluss des Informationsgehalts einer Rückmeldung und die Auswirkungen der Rückmeldungsmodalität auf die neuronale Aktivität eines Nutzers werden untersucht. Die zweite Studie ermittelt Faktoren, die die Schwelle einer gerade noch wahrnehmbaren Verzögerung der Systemantwort beeinflussen und analysiert die neuronale Aktivität, die durch unerwartete Verzögerungen oberhalb, an, und unter der Wahrnehmungsschwelle hervorgerufen wird. Die dritte Studie kontrolliert durch Anpassung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer Verzögerung die Erwartung des Nutzers über den zeitlichen Verlauf der Interaktion und ermittelt den Einfluss der Nutzererwartung auf die neuronale Aktivität. Die vierte Studie untersucht die Auswirkungen verzögerter Systemantworten auf das Nutzerverhalten, im Speziellen auf die Tastendruckdynamik. Die Ergebnisse der einzelnen Studien werden in den jeweiligen Abschnitten ausführlich diskutiert.

Im dritten und letzten Teil der Arbeit erfolgt eine studienübergreifende Diskussion der Ergebnisse und der Ausblick auf mögliche zukünftige empirische Studien. Abschließend werden Konsequenzen der Ergebnisse dieser Arbeit für die HCI diskutiert.

Teil I

Theoretischer und empirischer Hintergrund

1 Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext

1.1 Rückmeldungen in der Kommunikation

1.1.1 Erkenntnisse aus der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation

Rückmeldungen sind die Bausteine einer erfolgreichen Interaktion sowohl zwischen Menschen als auch zwischen Mensch und technischem System. Die folgenden Kapitel geben einen Einblick, welche Eigenschaften einer Rückmeldung hierbei relevant sind und welche zeitlichen Parameter die Kommunikation beeinflussen. Bevor näher auf die Rolle der Systemrückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion eingegangen wird, folgt an dieser Stelle eine kurze Einführung in die zeitliche Struktur der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation.

Die zwischenmenschliche Kommunikation beruht auf der Norm der Reziprozität. Dies bedeutet, dass Sender und Empfänger in einem gegenseitigen Austausch verbaler oder non-verbaler Informationen stehen und versuchen, den Kommunikationspartner zu verstehen. Der Ablauf der Kommunikation erfolgt nach einem immer gleichen Grundschemata. Der Sender einer Mitteilung enkodiert (verbal oder nonverbal) die zu überbringende Information und der Empfänger der Mitteilung dekodiert die Information und versucht, die Absicht des Senders zu interpretieren. Im Folgenden verschlüsselt der Empfänger seinerseits seine Antwort. Die minimalste Form einer solchen Rückmeldung ist die „Empfangsbestätigung“ (Delhees, 1994). Diese kann verbal, paraverbal oder anhand von Mimik oder Gestik – nonverbal – übermittelt werden (Renaud & Cooper, 2000). Der wechselseitige Prozess der Kommunikation bedingt, dass der Sender zugleich Empfänger und umgekehrt der Empfänger auch immer zugleich Sender ist. Der Sender erhält auf diese Weise fortlaufend Signale des Empfängers, die ihm bestätigen, dass seine gesendeten Informationen vom Gegenüber verstanden wurden (Delhees, 1994). Dieser Prozess der wechselseitigen Rückmeldung beider Kommunikationspartner (*grounding*) ist für eine gelungene Kommunikation unersetzlich. Das *grounding* bildet die Basis für eine gemeinsame

1.1 Rückmeldungen in der Kommunikation

Kommunikation und leitet sich aus dem Gestaltgesetz der Geschlossenheit (*principle of closure*¹) ab (Clark & Brennan, 1991; Jurafsky & Martin, 2008).

Die Grundform der menschlichen Kommunikation bildet der Dialog. Hierbei handelt es sich um ein Gespräch zu zweit mit der Absicht, zur „Wahrheit“ zu finden. Unter dem Begriff des Dialoges werden unterschiedlich komplexe Gesprächsformen zusammengefasst, die von einfachen Zeichensystemen zwischen Mutter und Kind bis zu Diskussionen und Streitgesprächen reichen. Allen Dialogformen eigen ist, dass sie eine zeitliche Synchronisierung erfordern (Delhees, 1994).

Für eine erfolgreiche Kommunikation muss das Verhalten der Kommunikationspartner aufeinander abgestimmt sein. Stellen sich beide Kommunikationspartner nicht aufeinander ein, kann es zu Überschneidungen zwischen Sprechsequenzen oder zu unbeabsichtigt langen Pausen im Gespräch kommen. Bereits Sprechpausen von 1,8 - 2,2 Sekunden können für die beteiligten Kommunikationspartner emotional belastend sein. Generell gilt, dass Pausen und Unterbrechungen den Gesprächsfluss behindern (Delhees, 1994).

Der koordinierte Wechsel zwischen Sprecher und Zuhörer wird in der Literatur als *turn taking* bezeichnet. Nach Sacks et al. (1974) erfolgt dieser Wechsel meist ohne oder nur mit minimalen Lücken oder Überlappungen der Sprecher. Über verschiedene Sprachen und Kulturen hinweg findet der Sprecherwechsel innerhalb weniger Sekundenbruchteile statt (Stivers et al., 2009). Diese kurzen Pausen sind meist nicht länger als 400 ms, im Durchschnitt erfolgt ein Drittel aller Wechsel in weniger als 200 ms (Wilson & Zimmerman, 1986). Diese Zahlen machen deutlich, dass der Übergang von einem zum nächsten Sprecher nicht nur eine Reaktion auf das Ende der letzten Äußerung des Gesprächspartners ist, sondern verschiedene Hinweisreize bereits während der aktuellen Äußerung den Wechsel ankündigen (Beattie et al., 1982; Hirvenkari et al., 2013). Die neuronalen Mechanismen des *turn taking* sind weitestgehend unerforscht. Eine wichtige Rolle für das *turn taking* spielen Wahrnehmungs- und Gedächtnisprozesse sowie die Planung und Kontrolle der Motorik (Bonaiuto & Thórisson, 2008). Scott et al. (2009) vermuten, dass der motorische Kortex Sprechtempo und Rhythmus des Gesagten verfolgt und auf diese Weise einen nahtlosen Übergang im Gespräch ermöglicht. Verschiedene Modelle versuchen den Prozess des Sprecherwechsels und die Struktur der Pausen zwischen den Wechseln zu beschreiben (Bonaiuto & Thórisson, 2008; Wilson & Wilson, 2005). Hierbei unterscheidet sich in den verschiedenen Modellen die Bedeutung bzw. die Gewichtung der Pausen zwischen den Sprecherwechseln.

Die subjektive Bewertung der Dauer einer Pause in der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation scheint sowohl von den Kommunikationspartnern selbst, als auch von Umgebungsfaktoren abhängig zu sein (Seow, 2008; Wilson & Zimmerman, 1986). Beispielsweise wird eine längere

¹ Das **Gestaltgesetz der Geschlossenheit** bezieht sich ursprünglich auf die Wahrnehmung visueller Objekte als Einheit, obwohl diese bspw. durch Überlagerung mit anderen Objekten teilweise verdeckt sind. Jurafsky & Martin (2008) und Clark (1996) wenden das Prinzip der Geschlossenheit im Kontext von Interaktionen an. Nach Clark (1996) benötigen handelnde Personen einen Hinweis, der ihnen, ausreichend für die aktuelle Absicht, anzeigt, dass sie ihre Handlung erfolgreich ausgeführt haben.

Pause erwartet, wenn dem Gesprächspartner eine schwierige Frage gestellt wird oder dieser bei Ansprache in eine andere Aufgabe vertieft ist.

1.1.2 Zur Bedeutung von Systemrückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion

Nicht nur in der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation sind die Rückmeldungen des Empfängers für den Sender einer Information unerlässlich. Auch in der Mensch-Computer-Interaktion (HCI) sind Rückmeldungen des Systems eine Grundvoraussetzung einer gelungenen Kommunikation zwischen Nutzer und System. Shneiderman & Plaisant (2005) definieren Rückmeldungen als eine Mitteilung des Systems an den Nutzer unmittelbar nach dessen Eingabe. Als Antwort auf die Eingabe eines Nutzers informieren Systemrückmeldungen den Nutzer über den aktuellen Status des Systems (Renaud & Cooper, 2000). Für Pérez-Quiñones & Sibert (1996) übernimmt das System durch die Präsentation der Rückmeldung die Rolle eines Konversationspartners.

Der Nutzer benötigt vom System einen Hinweis, der ihm anzeigt, dass seine Anweisungen erfolgreich ausgeführt wurden. Er unterliegt hierbei wie alle handelnden Personen dem Prinzip der Geschlossenheit (*principle of closure*) (Clark, 1996; Jurafsky & Martin, 2008) und erwartet eine Rückmeldung des Systems, die in einem kausalen Zusammenhang zu seiner Eingabe steht (*grounding*). Fehlt eine solche Systemrückmeldung, bleibt der Nutzer im Unklaren, ob seine Anweisung vom System registriert und verstanden wurde oder ob er seine Anweisung wiederholen sollte. Fehlt die Rückmeldung des Systems, zeigen Nutzer ein ausbesserndes Verhalten, indem sie z.B. ihren Befehl erneut übermitteln (Pérez-Quiñones & Sibert, 1996).

Systemrückmeldungen können unterschiedliche Inhalte transportieren. Die einfachste Form der Rückmeldung informiert den Nutzer, dass seine Eingabe registriert wurde („Empfangsbestätigung“, siehe Abschnitt 1.1.1, Seite 4). Beispielhaft für eine solche Rückmeldung ist das Aufleuchten der Taste eines Fahrstuhls unmittelbar nachdem diese vom Nutzer betätigt wurde. Alle weiteren Rückmeldungsarten, die den Nutzer u.a. über die Korrektheit seiner Eingabe informieren, schließen diese basale Aussage bereits immer in ihren Informationsgehalt mit ein. Positive Rückmeldungen zeigen dem Nutzer, dass sein Verhalten zielführend war und bestärken ihn in seinem weiteren Vorgehen. Negative Rückmeldungen führen dagegen zu einem Überdenken der Handlungsstrategie und zu einer Verhaltensänderung (Renaud & Cooper, 2000).

Systemrückmeldungen können in den verschiedenen Sinnesmodalitäten dargeboten werden. In der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation werden Rückmeldung über verschiedene Kommunikationskanäle übertragen. Entsprechend der Situation und der Umgebungsfaktoren werden neben verbalen und paraverbalen Äußerungen Gestik und Mimik eingesetzt, um die Aussagen des Kommunikationspartners zu bestätigen. Beispielsweise genügt in einer lauten Umgebung ein Kopfnicken zur Bestätigung des Gesagten, während bei eingeschränkten visuellen Informationen

auf auditorische Rückmeldungen („mmh“, „ja“) zurückgegriffen wird. Ebenso werden in der HCI visuelle und auditive Rückmeldungen sowie Kombinationen aus beiden verwendet. Zur Zeit am häufigsten Verwendung finden visuelle Rückmeldungen (Perrin et al., 2008). Hierbei werden vor allem grafische Darstellungen gegenüber Textausgaben bevorzugt (Renaud & Cooper, 2000). Eine eindeutige Empfehlung aus der Software-Ergonomie, welche Modalität zu bevorzugen ist, existiert jedoch nicht. Vielmehr wird die Wahl der Modalität durch den Interaktionskontext bestimmt. Verschiedene Umgebungsfaktoren, individuelle Vorlieben und Fähigkeiten des Nutzers sowie die technische Umsetzung des Systems determinieren die Auswahl der Modalität einer Systemrückmeldung (Kong et al., 2011).

Nicht nur die Modalität einer Rückmeldung spielt für die Nutzerzufriedenheit eine große Rolle, sondern auch die zeitliche Kontingenz der Rückmeldung. Die Ergebnisse und Empfehlungen aus den verschiedenen Studien werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst und sollen einen Einblick in das Forschungsfeld der Systemresponsezeit (SRZ) geben.

1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

1.2.1 Definition der Systemresponsezeit

Der Begriff der Systemresponsezeit (SRZ) geht zurück auf Carbonell et al. (1968) und Nickerson et al. (1968). Nach Carbonell et al. (1968) bezeichnet er das Zeitintervall zwischen der Eingabe eines Nutzerkommandos und der Ausgabe des Resultats durch das System. Neuere Definitionen von Martin (1973), Shneiderman & Plaisant (2005) und Seow (2008) stimmen teils wortwörtlich mit dieser ersten Definition überein. Holling (1989) sind diese Definitionen zu speziell, da zeitliche Verzögerungen auch zwischen den Operationen eines Rechners auftreten können. Folglich definiert er SRZ allgemein als Unterbrechung der Operationen von Computersystemen. Mit dieser Verallgemeinerung löst Holling (1989) die SRZ vom Interaktionskontext zwischen Mensch und Computer. In der vorliegenden Arbeit steht dieser Interaktionskontext - aus manueller Eingabe des Nutzers und visueller Ausgabe des Systems - jedoch im Mittelpunkt der Untersuchungen. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit die Definition der SRZ nach Carbonell et al. (1968) verwendet werden.

1.2.2 Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Systemresponsezeiten

Einen ersten wegweisenden Artikel zu angemessenen und vom Nutzer tolerierten SRZ veröffentlichte Miller (1968). In seiner Arbeit empfiehlt er für 17 verschiedene Interaktionskontexte unterschiedlich lange SRZ und verweist dabei auf die Ähnlichkeit der Mensch-Computer-Interaktion mit der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation. Die empfohlene Dauer einer SRZ, die im Einklang mit dem Kommunikationsprozess zwischen Mensch und System steht, reicht von 100–200 ms für Aktionen, die wie mechanische Handlungen sofort ausgeführt werden sollen (Tastendruck, Mausbewegung) bis hin zu SRZ von 10 s bis 15 s für einfache und mehreren Minuten für komplexe Rechenschritte. Millers Empfehlungen basierten zu diesem Zeitpunkt (1968) noch nicht auf empirischen Studien, sondern auf Schätzungen und Schlussfolgerungen, die er aus seinen Beobachtungen von praktischen Tätigkeiten mit damaligen Computersystemen zieht. Dem ungeachtet erkannte Miller (1968) bereits, dass die tolerierte Dauer einer SRZ vom Kontext der Aufgabe und der Erwartung des Nutzers abhängt.

Doch wie viel Zeit darf nach der Eingabe des Nutzers bis zur Ausgabe vergehen, ohne dass der Nutzer eine Verzögerung bemerkt? Card et al. (1983) leitet den Grenzwert einer SRZ aus der wahrgenommenen Kausalität zwischen zwei Ereignissen (Eingabe - Ausgabe) her. Die unmittelbare/sofortige Kausalität zweier aufeinanderfolgender Ereignisse, bspw. die simulierte Kollision zweier Objekte, geht laut Card et al. (1983) nach ca. 50 ms bis 100 ms verloren. Nach ca. 200 ms nehmen Probanden auch die verzögerte Kausalität zwischen den Ereignissen nicht mehr wahr und betrachten die beiden Ereignisse als voneinander unabhängig. Dieses Zeitintervall entspricht zudem der Verarbeitungsdauer eines visuellen Stimulus, der zu einem Zeitpunkt $t = 0$ auf die Retina trifft und zum Zeitpunkt $t = 50\text{--}200$ ms vom Betrachter bewusst detektiert wird. Dieser Wert stellt eine Mittelung dar, weil die verschiedenen Informationen eines Bildes zu unterschiedlichen Zeiten im visuellen Speicher (Arbeitsgedächtnis) zusammenlaufen. Zudem beeinflussen Umgebungsfaktoren, wie die Helligkeit, die Geschwindigkeit mit der ein Stimulus wahrgenommen wird (Card et al., 1983).

Ebenso beeinflussen individuelle Faktoren die Wahrnehmung einer SRZ. Shneiderman & Plaisant (2005) fasst drei primäre Einflussfaktoren auf die SRZ zusammen:

- **Vorangegangene Erfahrungen** prägen die Erwartungen zukünftiger Interaktionen.
- **Individuelle Unterschiede** in der Persönlichkeit führen zu einer unterschiedlichen Akzeptanz von SRZ.
- **Unterschiedliche Aufgaben** beeinflussen die Akzeptanz der SRZ auf verschiedene Weise.

Unerfahrene Nutzer akzeptieren im Umgang mit dem System längere SRZ als erfahrene Nutzer (Shneiderman & Plaisant, 2005). Hat sich die Erwartung an eine bestimmte SRZ aus-

1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

gebildet, bestimmt diese die Toleranzschwelle. Liegt eine SRZ über dieser Schwelle, wird die SRZ als zu langsam wahrgenommen (Seow, 2008). Nach Seow (2008) und beruhend auf dem Gesetz von Weber² (Killeen & Weiss, 1987) werden Abweichungen um mehr als 20 % von einer erwarteten SRZ vom Nutzer detektiert und können möglicherweise als störend empfunden werden.

Seow (2008) und Shneiderman & Plaisant (2005) gehen davon aus, dass die Toleranzschwelle einer SRZ sowohl von Umweltfaktoren, wie der Tageszeit und Umweltlärm als auch von individuellen Unterschieden beeinflusst wird. So bestimmt die Persönlichkeit des Nutzers, sein Alter, seine aktuelle Stimmung sowie der subjektive Zeitdruck, eine Aufgabe abzuschließen, die Toleranz einer SRZ (Seow, 2008; Shneiderman & Plaisant, 2005).

Sowohl die Komplexität einer Aufgabe als auch die Vertrautheit des Nutzers mit dieser Aufgabe beeinflussen die Wahrnehmung einer SRZ. Einfache und sich wiederholende Aufgaben sollten für den Nutzer schnell und ohne Wartezeiten ausführbar sein. Bereits Verzögerungen von weniger als 100 ms verärgern den Nutzer. In komplexeren Aufgaben werden dagegen auch längere SRZ vom Nutzer toleriert (Shneiderman & Plaisant, 2005). Treten die SRZ konstant auf, können die entstehenden Pausen genutzt werden, um weitere Arbeitsschritte voranzuplanen. Nutzer sind somit durchaus in der Lage ihr Verhalten an SRZ anzupassen. Ungeachtet dessen stellen Shneiderman & Plaisant (2005) jedoch fest, dass mit zunehmender SRZ auch immer die Unzufriedenheit der Nutzer mit dem System steigt. Welche weiteren Auswirkungen Verzögerungen der SRZ auf den Nutzer haben, wird im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

1.2.3 Auswirkungen der Systemresponsezeiten

Fehler

Abhängig von der Aufgabe können sich bereits sehr kurze SRZ (< 200 ms) negativ auf die Leistung eines Computernutzers auswirken (Dabrowski & Munson, 2011). Treten Verzögerungen der SRZ innerhalb einfacher Aufgabenschritte (*intra-task*) auf, wie dem Positionieren des Mausursors oder einer Texteingabe per Tastatur, kommt es zum Anstieg der Fehlerrate. MacKenzie & Ware (1993) manipulierten die SRZ eines Cursors von 8,3 ms bis 225 ms und zeigten, dass bereits die minimal wahrnehmbaren Verzögerungen von 75 ms die Fehlerrate der Nutzer negativ beeinflussen. Mit der Zunahme der SRZ stieg die Fehlerrate weiter an. Ein ähnliches Ergebnis erzielten Williges & Williges (1982) indem sie die Präsentation von Buchstaben auf dem Bildschirm nach der Tastatureingabe des Nutzers variabel verzögerten. SRZ von mehr als

²**Webersches Gesetz:** die differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle (*just noticeable difference*) ist die minimale Abnahme oder Zunahme einer Stimuluseigenschaft (z.B. Gewicht, Helligkeit, Lautstärke), die vom Organismus detektiert/wahrgenommen werden kann. Dieser Unterschied des Stimulus ΔS steht in einem konstanten Verhältnis k zum vorherigen Stimulus S . Das Gesetz gilt für die meisten Reizwerte, allerdings nicht für Extremwerte eines Reizes und auch nicht für trainierte Beobachter (Killeen & Weiss, 1987; Seow, 2008).

1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

200 ms erhöhten die Fehleranzahl und je länger die Verzögerung der SRZ andauerte desto mehr Fehler machten die Nutzer beim Schreiben. Dieser Effekt steht im Einklang mit der Auffassung Thadhanis (1984), dass besonders SRZ unter einer Sekunde nachfolgende kognitive Prozesse stören, da sie in den Handlungsprozess des Nutzers eingreifen und die Aufgabenbewältigung unterbrechen. Als Konsequenz muss der Nutzer bereits geplante Handlungsschritte neu überdenken. In der vorliegenden Arbeit stehen diese sehr kurzen SRZ, die innerhalb einer Aufgabe auftreten, im Mittelpunkt der Untersuchungen (*intra-task*).

Verzögerungen zwischen zwei Aufgaben (*inter-task*) haben dagegen kaum negative Auswirkungen, vor allem dann nicht, wenn diese Aufgaben für den Nutzer einfach zu lösen sind (Dabrowski & Munson, 2011). Werden die Aufgaben komplexer, zeigt sich nach Barber & Lucas (1983), dass die Fehleranzahl beim Lösen einer Aufgabe und die Dauer der SRZ einen U-förmigen Zusammenhang aufweisen. Die Ermittlung einer optimalen SRZ zwischen zwei Aufgaben ermöglicht in diesem Fall eine Minimierung der Fehleranzahl. Auf Verzögerungen innerhalb einer Aufgabe (*intra-task*) lässt sich dieser Befund, wie im vorhergehenden Absatz gezeigt, nicht übertragen.

Produktivität/Nutzerantwortzeit

Mit der Zunahme der SRZ sinkt die Produktivität der Nutzer. Bereits kurze SRZ im Bereich von wenigen Hundert Millisekunden beeinflussen die Produktivität/Nutzerleistung negativ (Dabrowski & Munson, 2011). MacKenzie & Ware (1993) zeigten, dass Verzögerungen von 75 ms die Leistung in einfachen motorisch-sensorischen Aufgaben wie das Positionieren eines Cursors, beeinträchtigen. Längere SRZ von 225 ms verstärkten diesen negativen Effekt auf die Nutzerleistung. Im Vergleich zu den kürzesten SRZ von 8,3 ms stieg die benötigte Zeit zur Bewegung des Cursors um 63,9 %. Je einfacher und automatisierter eine Aufgabe ist, desto größer ist nach Shneiderman & Plaisant (2005) der Zuwachs an Produktivität durch kürzere SRZ.

Weiterhin wird angenommen, dass sich ein Anstieg der SRZ auf die Art und Weise der Interaktion des Nutzers mit dem System auswirkt. So passen die Nutzer ihre Antwortzeiten den SRZ des Systems an. Je größer die SRZ, desto länger ist auch die Nutzerantwortzeit. Mit Zunahme der SRZ entwickelt der Nutzer ein strategisches Vorgehen, um die Interaktionsschritte mit dem System zu minimieren. So werden Eingaben überdacht und sparsamer verwendet (Dabrowski & Munson, 2011).

Psychologische Effekte

Ein Anstieg der SRZ bewirkt eine Abnahme der Zufriedenheit mit dem System und führt zu Frustration, Verärgerung und zu Irritationen der Nutzer im Umgang mit dem System (Dabrowski & Munson, 2011). Anders als bei der Fehlerrate und Produktivität scheint die Nutzerzufrieden-

heit aber auch bei längeren Verzögerungen der SRZ konstant zu bleiben und fällt erst nach einer bestimmten Dauer der SRZ steil ab. Diese Toleranzschwelle, bevor die Nutzerzufriedenheit sinkt, ist wiederum abhängig von der zu lösenden Aufgabe. Agiert das System zudem mit unvorhersehbaren variablen SRZ, verliert der Nutzer das Gefühl, die Kontrolle über das System zu besitzen (Dabrowski & Munson, 2011). Besonders unerwartet lange SRZ können daher beim Nutzer Besorgnis und Frustration auslösen (Shneiderman & Plaisant, 2005). Den beobachteten emotionalen Reaktionen liegen physiologische Prozesse zugrunde, die in verschiedenen Studien untersucht wurden.

Physiologische Effekte

Die physiologischen Untersuchungen beruhen auf der Annahme, dass verzögerte SRZ zu psychischer Beanspruchung³ des Nutzers und somit zu physiologischen Stressreaktionen führen. Untersucht wurden die Herzrate, der Blutdruck und der Hautleitwert. Die psychophysiologischen Experimente aus den späten 80er und frühen 90er Jahren hatten zum Ziel, eine optimale SRZ für die jeweilige Aufgabenstellung zu bestimmen (Kohlisch & Kuhmann, 1997; Kuhmann et al., 1987; Thum et al., 1995). Ausgehend von der psychologischen Stresstheorie sollten nach Kuhmann et al. (1987) und Boucsein et al. (1984) sowohl die Dauer der SRZ als auch deren Variabilität einen Einfluss auf die Stressreaktion haben. Ursächlich hierfür ist, dass verzögerte SRZ die Arbeitsdauer einer Aufgabe verlängern. Durch die langsamere Ausführung seiner Tätigkeit fürchtet der Nutzer negative Konsequenzen. Dies kann zu Stressreaktionen führen. Sind die SRZ von variabler Dauer, steigt zusätzlich die Unsicherheit des Nutzers über den weiteren zeitlichen Interaktionsverlauf. Boucsein (2009) und Kuhmann et al. (1987) schlussfolgern aus der Arbeit von Monat et al. (1972), dass Unsicherheit einer der Hauptgründe für psychologischen Stress ist. Es sei darauf hingewiesen, dass Monat et al. (1972) aversive Stimuli in Form von schwachen Elektroschocks applizierten. Eine Vergleichbarkeit der Stressreaktion dieser Studie mit der Stressreaktion, die durch verzögerte SRZ ausgelöst wird, ist kaum möglich.

In einer Studie untersuchten Kuhmann et al. (1987) die Auswirkungen von kurzen (2 s) und langen (8 s) Verzögerungen, sowie den Unterschied zwischen variablen und konstanten SRZ. Variabel bedeutet in diesem Fall, dass die SRZ um den jeweiligen Mittelwert (2 s [0,5 s-5,75 s]) und (8 s [2,0 s-22,81 s]) schwanken. Die Ergebnisse zeigen, dass kurze SRZ von 2 s den systolischen Blutdruck erhöhen. Signifikante Änderungen der Herzrate konnten nicht nachgewie-

³Der Begriff der **psychischen Beanspruchung** wird durch die DIN EN ISO 10075-1 wie folgt definiert: „Psychische Beanspruchung ist die unmittelbare Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum in Abhängigkeit von seinen jeweiligen überdauernden und augenblicklichen Voraussetzungen einschließlich der individuellen Bewältigungsstrategien.“ Unter psychischer Belastung wird hierbei unter DIN EN ISO 10075-1:2000 „die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken“ verstanden.

DIN EN ISO 10075 „Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung“ Berlin: Beuth

1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

sen werden. Unter der Bedingung der langen SRZ von 8 s fanden Kuhmann et al. (1987) eine erhöhte Reaktion des Hautleitwerts und schlussfolgern, dass die erhöhten Werte auf die unfreiwilligen Arbeitspausen zurückzuführen sind. Aufgrund der Unterschiede zwischen Blutdruck und Hautleitwert schließen sie, dass der Blutdruck einen Indikator für physischen Stress darstellt, während die Veränderungen des Hautleitwerts auf emotionalen Stress zurückzuführen sind. Variable SRZ hatten in der Studie von Kuhmann et al. (1987) keinen signifikanten Einfluss auf die physiologischen Maße im Vergleich zu konstanten SRZ.

In einer späteren Studie untersuchten Schaefer & Kohlisch (1995) die Auswirkungen der SRZ auf mentale Prozesse mittels Elektroencephalographie (EEG). Sie untersuchten die Latenz und Amplitude der ereigniskorrelierten Potentiale N100 (Negativierung nach 100ms) und P300 (Positivierung nach 300 ms). Beide EEG-Komponenten treten häufig nach unerwarteten oder neuartigen Stimuli auf (Polich, 2007). Die standardmäßige SRZ lag in ihrem Experiment je nach Probandengruppe bei einer, zwei oder vier Sekunden. Unerwartet für die naiven Probanden wurde die Dauer der SRZ in 60 von 396 Durchgängen um 25 % verlängert oder verkürzt dargeboten. Während unerwartet langer SRZ erhöhte sich die Amplitude der P300. Außerdem beobachteten sie eine Abnahme der Arbeitsgeschwindigkeit. Schaefer & Kohlisch (1995) betonen daher die Wichtigkeit konstanter und vorhersagbarer SRZ in der Mensch-Computer-Interaktion.

1.2.4 Richtlinien zu Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung und das Erleben von SRZ wurden im Abschnitt 1.2.2 ausführlich diskutiert. Verschiedene Faktoren, wie die Persönlichkeit des Nutzers, vorangegangene Erfahrungen und vor allem die jeweilige Aufgabenstellung beeinflussen, ob eine Verzögerung in der Interaktion überhaupt bemerkt und als störend empfunden wird (Shneiderman & Plaisant, 2005). Aus diesem Grund existieren sowohl in der Industrie als auch in der Wissenschaft Richtlinien über die Einhaltung bestimmter Systemresponsezeiten.

Die ersten Richtwerte stammen von Miller (1968). Er teilte die empfohlenen SRZ entsprechend der auszuführenden Aufgabe ein. Systemantworten nach Eingaben per Tastendruck oder Lichtgriffel sollten innerhalb von 100-200 ms erfolgen. Sie sollten wie physikalische Eingaben dem Nutzer kennzeichnen, dass seine Eingabe registriert wurde. Komplexeren Aufgaben erlaubte er dagegen eine längere SRZ von bis zu 15 s.

Shneiderman & Plaisant (2005) empfehlen ähnlich wie Miller (1968) SRZ in Abhängigkeit von der Aufgabenkomplexität. Die Systemantwort auf eine Eingabe per Tastatur oder Mausbewegung sollten innerhalb von 50-150 ms erfolgen. Einfache und sich wiederholende Aufgaben sollten innerhalb einer Sekunde ausgeführt werden. Routineaufgaben sollten innerhalb von 2-4s und komplexe Aufgaben innerhalb von 8-12s vom System beantwortet werden.

1.2 Systemresponsezeiten in der Mensch-Computer-Interaktion

Sie gehen davon aus, dass die Toleranz der Nutzer mit der Komplexität der Aufgabe steigt. Offen bleibt jedoch, wie Shneiderman & Plaisant (2005) Komplexität definieren. So kritisieren Dabrowski & Munson (2011), dass auch komplexe Aufgaben aus einzelnen Tastendrücken und Mausklicks aufgebaut sind, deren SRZ unter 200 ms liegen sollten.

In seinem Buch *Designing and Engineering Time* beschreibt Seow (2008) drei weitere Richtlinien aus Forschung und Industrie (MIL-STD 1472F (1999), ESD/MITRE (Smith & Mosier, 1986), TAFIM (1996)), die ebenfalls auf dem Grad der Aufgabenkomplexität beruhen. Diese Richtwerte basieren auf der Rechenleistung der damaligen Hard- und Software und können heute in vielen Fällen als veraltet betrachtet werden.

Seow (2008) selbst vertritt einen Nutzer-zentrierten Ansatz zur Kategorisierung der SRZ. Wichtig ist, was der Nutzer wahrnimmt und diese Wahrnehmung wird durch die Art der Interaktion und durch dessen Erwartungen beeinflusst (Seow, 2008). Basierend auf den zeitlichen Erwartungen der Nutzer an eine bestimmte Interaktion stellt Seow (2008) vier Zeitkategorien für tolerierbare SRZ auf:

- **Augenblickliche SRZ (0,1 bis 0,2 Sekunden):** Nutzer erwarten für bestimmte einfache Eingaben, wie dem Schreiben per Tastatur oder auf einen Mausklick hin, dass sich das System wie eine physikalische Einheit verhält und physikalischen Gesetzen folgt. Alle Interaktionen, die eine physikalische Objekt nachahmen, sollten daher augenblicklich antworten.
- **Sofortige SRZ (0,5 bis 1 Sekunde):** Bestätigungen der Nutzereingabe durch das System oder die Antwort auf einfache Eingabekommandos sollten umgehend erfolgen, so dass die Erwartungen des Nutzers erfüllt werden.
- **Kontinuierliche SRZ (2 bis 5 Sekunden):** Den Nutzern ist bewusst, dass bestimmte Rechenschritte mehr Zeit in Anspruch nehmen als andere. Daher tolerieren sie Wartezeiten bis zu 5 Sekunden. Es wird aber empfohlen sofortige Rückmeldungen zu präsentieren, die den Nutzer über den Status des Systems informieren, sobald die SRZ 2 Sekunden übersteigt.
- **Zugehörige SRZ (7 bis 10 Sekunden):** Sobald die Dauer der Systemantwort 5 Sekunden übersteigt, sind Rückmeldungen über den Status des Systems zur Aufrechterhaltung der Kommunikation zwingend notwendig. Wird auch nach 10 Sekunden keine Antwort des Systems präsentiert, so überschreitet die Wartezeit die Aufmerksamkeitsspanne des Nutzers und er wendet sich anderen Aufgaben zu.

Dabrowski & Munson (2011) verfolgen einen weiteren Ansatz zur Kategorisierung von SRZ. Sie teilen die Interaktion von Nutzer und System in zwei Aufgabenklassen ein. Zum einen *Kontrollaufgaben*, für die ein Nutzer einen „Eins-zu-Eins-Austausch“ zwischen seiner Handlung

und der Ausgabe des Systems erwartet und zum anderen *Konversationsaufgaben*, die in ihrer Struktur komplexer sind und aus mehreren Interaktionsschritten aufgebaut sein können. Für Kontrollaufgaben gilt, dass der Nutzer das Gefühl haben sollte, ein physikalisches Gerät zu bedienen. Erstrebenswert sind SRZ von 0 ms bis maximal 200 ms. Auf diese Weise entsteht beim Nutzer das Gefühl, das System zu kontrollieren.

Mit dem stetigen Fortschritt in der Entwicklung schnellerer Systeme steigt die Erwartung der Nutzer, dass bestimmte Interaktionsschritte umgehend vom System beantwortet werden. Interaktionen, die vor einigen Jahren/Jahrzehnten noch aus Konversationsaufgaben, bspw. mehreren Kommandoingaben bestanden, werden heute mit einem einzigen Handlungsschritt (Kontrollaufgabe), bspw. einem Mausklick ausgeführt.

Verzögerungen in Kontrollaufgaben können einen negativen Einfluss auf Konversationsaufgaben ausüben. Jede noch so komplexe Interaktion mit einem Computersystem ist aus Teilschritten aufgebaut, die aus einfachen Tastendrücken, Mausklicks etc. bestehen. Die einzelnen Teilschritte bestimmen das Tempo der Konversation. Wie groß die Toleranz einer Verzögerung innerhalb der einzelnen Teilschritte ist, hängt von der Komplexität der vorhergehenden Teilaufgabe ab. Nach Dabrowski & Munson (2011) wird die Komplexität einer Aufgabe aus der physikalischen Belastung, d.h. der Anzahl Tastendrucke, Mausklicks etc. und aus der kognitiven Belastung bestimmt. Die Erfahrung und das Wissen des Nutzers beeinflussen die Informationsverarbeitung und die Lösungsstrategien einer Aufgabe und können so die kognitive Belastung reduzieren. Sowohl individuelle Faktoren als auch die Konversationsaufgabe selbst tragen nach Dabrowski & Munson (2011) somit zur Toleranz von Verzögerungen in Konversationsaufgaben bei.

Die Ursachen und theoretischen Annahmen, warum Verzögerungen der Systemantwort den Verlauf einer Interaktion negativ beeinflussen, werden im folgenden Abschnitt anhand verschiedener psychologischer Theorien beleuchtet.

1.3 Psychologische Theorien zur Systemresponsezeit

1.3.1 Unterbrechung von Handlungsabläufen – Mandler (1964)

Mandler (1964) beschäftigte sich in seinem emotionstheoretischen Ansatz mit den Auswirkungen von Unterbrechungen in Verhaltens- und Handlungsabläufen. Nach Mandler (1964) bestehen Handlungsabläufe aus ganzheitlichen, wohl organisierten Sequenzen, welche nicht als einfache Handlungskette, sondern als Ganzes, als eine Einheit ausgeführt werden. Erst durch den ständigen Gebrauch und häufige Wiederholung bilden sich diese wohl organisierten Handlungssequenzen aus.

Eine Unterbrechung findet laut Mandler immer dann statt, wenn eine wohl organisier-

te Handlungssequenz nicht beendet werden kann oder „aus welchen Gründen auch immer“ zeitlich verzögert wird (Mandler, 1964, Seite 168). Nur solche Blockaden und Verzögerungen, die für das Individuum unvorhersehbar sind, führen auch tatsächlich zu Unterbrechungen einer Handlungssequenz. Sind solche ungewollten Pausen vorhersehbar, werden diese in die Verhaltenssequenzen des Individuums eingebaut und werden nicht mehr als Unterbrechungen wahrgenommen. Die Unterbrechungen haben motivationale Auswirkungen auf das Verhalten, die abhängig von der Situation zum Zeitpunkt der Unterbrechung und den bisherigen Erfahrungen des Individuums sind.

Wird eine Handlung unterbrochen, tendiert der Organismus dazu, die einmal begonnene Handlung beenden zu wollen. Nach Mandler gilt für Unterbrechungen von wohl organisierten Handlungen folgende Maxime: *„If at first you don't succeed, try again“* (Mandler, 1964, Seite 169). Auf eine Unterbrechung der einmal begonnen Handlung folgt als erstes die Wiederholung der Handlung. Mandler (1964) nimmt an, dass dieses Verhalten auf den Erfahrungen des Individuums beruht. Viele alltägliche Handlungen, wie das Einwerfen von Geldmünzen in Automaten oder das Bedienen eines Feuerzeugs funktionieren oftmals erst beim zweiten oder dritten Versuch. Führt die Wiederholung der Handlung nicht zum Erfolg, so wird sie laut Mandler im folgenden Versuch mit mehr Kraft ausgeführt. Auch Ersatzhandlungen können als Folge von Unterbrechungen der aktuellen Handlung auftreten.

Mandler (1964) postuliert, dass eine Unterbrechung einer Handlungssequenz zu physiologischen Reaktionen führt, die wiederum verschiedene Emotionen im Individuum hervorrufen können. Welche Emotion ausgelöst wird, hängt von Situationsfaktoren und den individuellen Erfahrungen ab. Mandler beruft sich hierbei auf die 2-Faktoren-Theorie von Schachter & Singer (1962), die besagt, dass die Art einer hervorgerufenen Emotion sowohl von der physiologischen Erregung als auch vom jeweiligen Kontext abhängig ist. Besonders lang andauernde Unterbrechungen können zu Angst, Ärger und Frustration führen, aber auch positive Emotionen wie Humor auslösen. Allerdings überwiegen nach Mandler augenscheinlich die negativen Emotionen, da Unterbrechungen allgemein als störend empfunden werden.

1.3.2 Wahrscheinlichkeitsmodell zur Beanspruchung durch Systemresponsezeiten – Holling (1989)

Holling (1989) stellte ein formalisiertes Modell zur Berechnung der Beanspruchung durch SRZ vor. Er schließt aus dem damaligen Kenntnisstand, dass SRZ „die effektive Arbeitszeit verkürzen, kognitive Prozesse stören und zusätzliche kognitive Operationen erfordern, einen Spannungszustand evozieren, zu einem erhöhten Arousal führen oder ein Gefühl der Hilflosigkeit herbeiführen“ (Holling, 1989, Seite 77). SRZ haben vorwiegend negative Folgen und verursachen auf diese Weise psychische Kosten (Stress). Stress wird ausgelöst, wenn der Organismus eine

aversive Prognose trotz zusätzlicher Bewältigungsversuche und Kontrolltätigkeiten nicht reduzieren kann. Zwei Komponenten des Wahrscheinlichkeitsmodells von Holling (1989) sind von zentraler Bedeutung: zum einen die *psychischen Kosten* und zum anderen die *Erwartung* des Nutzers. Ziel ist es, mittels des Wahrscheinlichkeitsmodells den Einfluss der Wartezeit auf das erlebte Stressniveau abzuleiten. Anhand von Kostenfunktionen schätzt er die Belastungsintensität, die durch SRZ hervorgerufen wird. Diese Kosten hängen von situativen und individuellen Faktoren ab. Für die Mehrzahl der von Holling (1989) formulierten Kostenfunktionen (bspw. lineare und superlineare Kostenfunktionen) führen variable SRZ zu mehr Stress als konstante SRZ.

Im Anschluss an die formalisierte Darstellung überprüfte Holling sein Wahrscheinlichkeitsmodell mittels empirischer Analysen. Zur Überprüfung der Belastung durch SRZ wählte Holling neben physiologischen Indikatoren wie dem Hautleitwert und dem Elektrokardiogramm auch Verhaltensindikatoren wie die Reaktionszeit der Probanden und deren subjektive Bewertung der Belastung. Mittels verschiedener Aufgabentypen untersuchte er den Einfluss konstant kurzer (2 s) und konstant langer (8 s) SRZ und die Auswirkungen variabler SRZ. Die von Holling gewählten Aufgabentypen unterscheiden sich aufgrund ihrer Komplexität voneinander. Er untersuchte den Einfluss der SRZ auf einfache Routineaufgaben (Sterzinger Aufgaben) und komplexere Problemlöseaufgaben (Turm-von-Hanoi-Aufgaben und Schiebespiel).

Auf Populationsebene wurden keine eindeutigen Auswirkungen der SRZ auf die Belastung in den verschiedenen Aufgabentypen gefunden. Aus diesem Befund schlussfolgert Holling (1989), dass sein Modell nur für eine Teilpopulation gültig ist. Wartezeiten rufen interindividuell sehr unterschiedliche Reaktionen hervor. Die individuellen physiologischen Reaktionen auf SRZ sind sehr heterogen und können nach Holling (1989) nicht auf ein allgemeines Stresssyndrom reduziert werden.

1.4 Relevanz des Themas und Motivation der neurowissenschaftlichen Studien

1.4.1 Systemresponsezeiten in der heutigen Mensch-Computer-Interaktions-Forschung

Mit der rasanten Verbesserung der Leistung von Computersystemen schwand Ende der 80er Jahre das Forschungsinteresse an Systemresponsezeiten. Die Geschwindigkeit der *central processing units* (CPU) und die damit verbundene Systemgeschwindigkeit sind heute für den durchschnittlichen Nutzer eines Personal-Computers mehr als ausreichend (Dabrowski & Munson, 2011).

In den letzten Jahrzehnten kam es zu einer verstärkten lokalen und globalen Vernetzung von Anwendungssystemen (verteilte Systeme) (Glier, 2005). Mit der Öffnung (1991) und dem stetigen Erfolg des Internets stieg die Zahl netzwerkbasierter Anwendungen. Eine große Zahl an

1.4 Relevanz des Themas und Motivation der neurowissenschaftlichen Studien

Anwendungen, die einst autonom auf einzelnen Systemen arbeiteten, werden heute durch netzwerkbasierter Programme ersetzt. Hierbei tauschen bspw. lokal ausgeführte Programme Daten mit dem Netzwerk aus (Dabrowski & Munson, 2011). Ohne in technische Details gehen zu wollen, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass verschiedene Parameter die Geschwindigkeit in verteilten Systemen limitieren (für einen Überblick siehe Glier (2005)). Verzögerungen bei der Datenübertragung können an verschiedenen Stellen auftreten (Glier, 2005). So kann es zu *Verarbeitungsverzögerungen* innerhalb des Vermittlungsrechners im Bereich von wenigen Mikrosekunden kommen. Abhängig von der Anzahl der Datenpakete und der jeweiligen Netzauslastung entstehen *Warteschlangenverzögerungen*. Die Dauer dieser Verzögerungen variiert stark und liegt im Mikro- und Millisekundenbereich. Sowohl die Arbeitsgeschwindigkeit der Verbindungsrechner als auch die Bandbreite der Verbindung beeinflussen die *Versendeverzögerung*. Weiterhin kann es abhängig vom Übertragungsmedium (kabelgebunden/kabellos) zu *Laufzeitverzögerungen* kommen. Besonders die Warteschlangenverzögerung und die Laufzeitverzögerung beeinflussen die Systemantwortzeit und führen zu variablen und unvorhersehbaren Antwortzeiten der Systeme (Glier, 2005).

Die Zunahme an netzwerkbasierter Anwendungen führt dazu, dass das Thema der SRZ heute erneut von Interesse ist. Besonders mobile Systeme, wie *Smartphones*, variieren netzbedingt in ihrer SRZ. Zudem kommt es durch (ungewolltes) Verlassen des Funknetzes häufig zum Verbindungsabbruch. Ein solches System wird als unzuverlässig wahrgenommen (Glier, 2005). Eine Erwartung über den zeitlichen Verlauf der Interaktion mit einem mobilen System bildet sich nicht aus. Vielmehr ist die Erwartung abhängig vom Interaktionskontext (Glier, 2005). Nur wenige Studien beschäftigen sich derzeit mit den Auswirkungen von verzögerten SRZ in mobilen Systemen. Bauer et al. (2007) beschreiben eine Anwendung mobiler Systeme in einem Türschließsystem und zeigen, dass auch in diesem Kontext Verzögerungen der Systemantwort (Öffnen der Tür) nicht akzeptiert werden.

In der Interaktion mit den verschiedenen Anwendungen ist dem Nutzer oftmals nicht bewusst, ob er augenblicklich mit einem autonomen oder einem verteilten System kommuniziert. Aus diesem Grund kann er die Ursache für eine Verzögerung der Systemantwort nur schwer nachvollziehen und sein Verhalten kaum anpassen. Die Problematik verzögerter Systemantworten muss in der Entwicklung neuer Software für netzwerkbasierter Systeme berücksichtigt werden, solange die Leistung des Netzwerks nicht konstant garantiert werden kann (Dabrowski & Munson, 2011).

Die Auswirkungen verzögerter Systemantworten auf das Verhalten und physiologische Parameter wurden im Abschnitt 1.2.3 ausführlich beschrieben. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist u.a. die Identifikation und Untersuchung der neuronalen Mechanismen, die durch verzögerte Systemantworten evoziert werden. Diese Daten bieten möglicherweise einen neuen

Erklärungsansatz für die beobachteten physiologischen Parameter und das Verhalten der Nutzer während verzögerter Systemantworten.

1.4.2 Neurowissenschaftliche Studien

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse der Software-Ergonomie-Forschung betonen die Relevanz zeitnaher Systemrückmeldungen für eine erfolgreiche Kommunikation zwischen Mensch und System (Dabrowski & Munson, 2011; Jurafsky & Martin, 2008; Nah, 2004; Seow, 2008; Shneiderman & Plaisant, 2005). Auch auf neuronaler Ebene konnten Behne et al. (2008) zeigen, dass registrierende Rückmeldungen in Form einer Empfangsbestätigung zum erfolgreichen Verlauf eines Dialogs beitragen. In ihrer Studie untersuchten sie mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) den Einfluss von verbalen Rückmeldungen während einer auditorischen Kategorisierungsaufgabe. Rückmeldungen, die zeitlich mit der Eingabe der Probanden korrelierten, wurden mit einer Bedingung ohne Rückmeldungen und einer Bedingung mit zeitlich unkorrelierten Rückmeldungen verglichen. Die zeitlich korrelierten Rückmeldungen führten zu einem Anstieg der Aktivität im dorsalen Striatum, einer Region, die dem menschlichen Belohnungssystem zugeordnet wird. Behne et al. (2008) schlussfolgern aus ihren Daten, dass registrierende Rückmeldungen den grundlegenden Rahmen zur Identifikation einer Dialogsituation bilden. Die Bedingung mit unkorrelierten Rückmeldungen und fehlenden Rückmeldungen führten im anterioren und posterioren Gyrus cinguli zu einer verstärkten Deaktivierung im Vergleich zu korrelierten Rückmeldungen (Behne et al., 2008). Es ist bekannt, dass verstärkte Deaktivierungen in diesen Regionen durch eine erhöhte kognitive Beanspruchung hervorgerufen werden, während in Ruhe eine Aktivierung der Regionen zu beobachten ist (McKiernan et al., 2003, 2006; Raichle et al., 2001). Rückmeldungen, die unkorreliert zur Antwort erfolgen, scheinen demnach den Nutzer stärker kognitiv zu belasten. Während Behne et al. (2008) die Probanden über alle Experimentalbedingungen aufklärten und die Probanden über das Ausbleiben und die Unkorreliertheit von Rückmeldungen informierten, untersuchten Kohrs et al. (2012) in einem ersten Experiment den Einfluss von unerwartet ausbleibenden Rückmeldungen. Zudem galt es zu klären, ob auch unerwartete Verzögerungen der Rückmeldung Auswirkungen auf die Hirnaktivität haben. Wie in der Studie von Behne et al. (2008) kam es im Belohnungssystem zum Anstieg der neuronalen Aktivität während sofortiger Rückmeldungen im Vergleich zu ausbleibenden Rückmeldungen (Kohrs et al., 2012). Die Aktivität im Belohnungssystem scheint in beiden Studien die zeitliche Korrelation der Eingabe des Probanden mit der Rückmeldung (Empfangsbestätigung) des Systems widerzuspiegeln. Die unerwartet ausbleibenden und die verzögerten Rückmeldungen lösten außerdem eine erhöhte Aktivität in einem Netzwerk der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle aus. Vor allem in der anterioren Insel und dem posterioren medialen Präfrontalkortex kam es zu einem signifikanten Anstieg der neuronalen Aktivität (Kohrs et al., 2012).

1.4 Relevanz des Themas und Motivation der neurowissenschaftlichen Studien

Nur wenige weitere Studien haben sich bisher mit den neuronalen Auswirkungen von verzögerten SRZ beschäftigt. Schaefer & Kohlisch (1995) untersuchten den Einfluss unerwartet langer und kurzer SRZ mittels EEG. Sie analysierten die beiden ereigniskorrelierten Komponenten N100 und P300. Unerwartet verzögerte SRZ erhöhten die P300-Amplitude. Schaefer & Kohlisch (1995) betonen, dass vor allem die Verletzung der Nutzererwartung zur erhöhten P300 beiträgt. Eine erhöhte P300 wird ebenfalls beobachtet, wenn ein erwarteter Stimulus ausbleibt (Busse & Woldorff, 2003). Die neuronale Antwort auf das Ausbleiben eines erwarteten Stimulus scheint den frühen Anteilen der P300, der P3a, zu entsprechen. Diese ereigniskorrelierte Komponente wird hervorgerufen, wenn die Aufmerksamkeit des Organismus unwillkürlich auf unerwartete Abweichungen in der Umwelt gelenkt wird (Busse & Woldorff, 2003). Die Quelle der frühen P3a wurde in frontalen Regionen wie dem Sulcus precentralis und der anterioren Insel lokalisiert, die an Aufmerksamkeitsprozessen beteiligt sind (Bledowski et al., 2004; Polich, 2007). Die spätere P3b-Komponente hat ihren Ursprung in weiter parietal und temporal gelegenen Regionen wie dem inferioren parietalen und inferioren temporalen Kortex (Bledowski et al., 2004; Polich, 2007). Die P300 ist eine typische Komponente der Orientierungsreaktion (OR) des Organismus (Barry et al., 2013; Corbetta et al., 2008; Polich, 2007). Es ist davon auszugehen, dass verzögerte SRZ, wie sie von Schaefer & Kohlisch (1995) und Kohrs et al. (2012) eingesetzt wurden, zu einer solchen OR des Organismus führen.

Nach Pavlov (1927) tritt eine OR immer dann auf, wenn sich Reize in der Umwelt verändern und die Aufmerksamkeit des Organismus auf die veränderten Reize gelenkt wird. Die Stärke der OR setzt sich additiv aus der Neuheit des veränderten Reizes und der Bedeutsamkeit der Veränderung für den Organismus zusammen (Ben-Shakhar, 1994). Hierbei kommt es zu messbaren physiologischen Veränderungen, wie dem Anstieg des Hautleitwertes (Bernstein, 1969; Ben-Shakhar, 1994), Veränderungen im Blutdruck und der Herzrate (Sokolov, 1963) sowie zu neurophysiologischen Veränderungen (Barry et al., 2013; Corbetta et al., 2008; Sokolov, 1963). Neuere Arbeiten zeigen, dass zwei komplexe Netzwerke von Hirnregionen an der OR beteiligt sind (Corbetta et al., 2008). Ein dorsales frontoparietales Netzwerk ermöglicht auf der Grundlage interner Ziele und Erwartungen die Auswahl relevanter Stimuli zur Zielerreichung. Es sendet *top-down*-Signale, die die Verarbeitung bestimmter Stimuluseigenschaften beeinflussen und so den Organismus zu einem zielgerichteten Verhalten befähigen. Auf diese Weise verbindet es die relevanten sensorischen Informationen mit der nachfolgenden Verhaltensantwort. Zum dorsalen Netzwerk zählen der dorsale parietale Kortex und der dorsale frontale Kortex entlang des Sulcus precentralis. Ein ventrales frontoparietales Netzwerk detektiert saliente und verhaltensrelevante Stimuli, die außerhalb des aktuellen Aufmerksamkeitsfokus liegen und lenkt die Aufmerksamkeit auf diese (*reorienting*). Das ventrale Netzwerk wird ebenfalls aktiv, wenn ein Verhalten unterbrochen oder beendet wird (Corbetta et al., 2008). Unterbrechungen eines Ereignisses entsprechen nicht den Erwartungen des Organismus und führen zu einem

vorübergehenden Fehler in der (zeitlichen) Vorhersage. Nach Zacks et al. (2007) wird diese Unterbrechung als Grenze zwischen zwei Ereignissen wahrgenommen. Die Aktivität des ventralen Netzwerks scheint charakteristisch für diesen Übergang zwischen zwei Ereignissen zu sein (Zacks et al., 2007). Zu diesem vorwiegend rechtshemisphärisch dominierten ventralen Netzwerk zählen die temporoparietale Verbindung und ventrale frontale Areale, wie der Gyrus frontalis inferior, sowie die anteriore Insel (Corbetta et al., 2008).

Die hier aufgezählten Hirnregionen des ventralen und des dorsalen frontoparietalen Netzwerks sind mögliche Areale, in denen eine veränderte neuronale Aktivität während verzögerter SRZ erwartet wird.

1.4.3 Experimente

Die vorliegende Arbeit beinhaltet vier empirische Studien, die mit Hilfe neurowissenschaftlicher und verhaltenspsychologischer Methoden das Forschungsfeld der Mensch-Computer-Interaktion aus einer neuen Perspektive beleuchten. Abschnitt 2.1 gibt einleitend einen Überblick über die verwendeten Methoden. Dem schließen sich von Kapitel 3 bis 6 die vier empirischen Studien an.

Studie I beinhaltet ein fMRT-Experiment, welches grundlegende Eigenschaften von Systemrückmeldungen untersucht. Es analysiert den Einfluss der sensorischen Modalität einer Systemrückmeldung auf die neuronale Aktivität und die Präferenz der Nutzer für eine bestimmte Modalität. Zudem soll das fMRT-Experiment aufklären, welchen Einfluss der Informationsgehalt einer Systemrückmeldung auf die neuronale Aktivität hat. Hierfür werden einfache Empfangsbestätigungen in Form von registrierenden Rückmeldungen mit bewertenden Systemrückmeldungen verglichen. Letztere besitzen einen höheren Informationsgehalt, da sie den Nutzer zusätzlich über die Korrektheit seiner Eingaben informieren.

Studie II bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit und beschäftigt sich mit den Auswirkungen von unerwartet verzögerten SRZ auf die neuronale Aktivität. Mit Hilfe der Studie II soll aufgedeckt werden, wie lang eine Verzögerung sein darf, bevor statistisch messbare Korrelate in der Hirnaktivität auftreten. Im ersten Schritt war es nötig zu überprüfen, wie lang eine Verzögerung sein muss, um vom Nutzer bewusst wahrgenommen zu werden. Hierfür wurde in einem Vorexperiment die Wahrnehmungsschwelle einer Verzögerung unter den gegebenen experimentellen Bedingungen bestimmt. Im anschließenden fMRT-Experiment wurden unerwartete Verzögerungen präsentiert, die unter, auf und über der Wahrnehmungsschwelle lagen.

Ausgehend von den Ergebnissen der Studie II und den Befunden der vorliegenden Literatur wird angenommen, dass nicht nur die Dauer der Verzögerung einen Einfluss auf das Nutzerverhalten hat, sondern dass dieses Verhalten auch von den Erwartungen der Nutzer abhängt. Aus diesem Grund wurde in einer dritten Studie der Einfluss der Nutzererwartung mittels zweier fMRT-Experimente überprüft. Hierfür wurde im ersten fMRT-Experiment die Auftretenshäufigkeit einer verzögerten SRZ erhöht, so dass diese Verzögerungen vom Nutzer erwartet werden. Im

1.4 Relevanz des Themas und Motivation der neurowissenschaftlichen Studien

zweiten fMRT-Experiment wurde zusätzlich die Vertrauenswürdigkeit in das System moduliert, indem einzelne Systemantworten ganz ausblieben. Das Ziel ist es, zu klären, inwieweit diese Parameter einen Einfluss auf die neuronale Aktivität haben.

In der letzten Studie IV dieser Arbeit wurde der Einfluss verzögerter SRZ auf das Verhalten der Nutzer untersucht. Im Speziellen wurde die Tastendruckdynamik analysiert, die Auskunft darüber gibt, wie zögerlich oder wie bestimmt ein Nutzer seine Eingabe ausführt. Mit Hilfe dieser Methode soll gezeigt werden, dass Unterbrechungen einer Handlungssequenz, wie sie durch unerwartete Verzögerungen entstehen, eine Anpassung des Nutzerverhaltens zur Folge haben können.

2 Methodische Grundlagen

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

2.1.1 Prinzip der Magnetresonanztomographie ¹

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist ein Verfahren zur nicht-invasiven Bildgebung anatomischer Strukturen und beruht auf den magnetischen Eigenschaften körpereigener Wasserstoffatome. Als ein zentraler Bestandteil des menschlichen Körpers bilden die Wasserstoffatome und im speziellen das positiv geladene Proton des Wasserstoffkerns die Grundlage der MRT. Neben der Eigenschaft der positiven elektrischen Ladung besitzt das Proton einen Eigendrehimpuls (Spin), d.h. es rotiert kontinuierlich um seine Längsachse. Eine rotierende elektrische Ladung wiederum besitzt ein magnetisches Dipolmoment μ . Die Stärke des magnetischen Dipolmoments, welche sich aus der atomkernabhängigen Konstante des gyromagnetischen Verhältnisses γ ergibt, bestimmt die Sensitivität des Atomkerns für die MR-Bildgebung. Im feldfreien Raum heben sich die elektromagnetischen Ladungen auf, da sich die Spins der Wasserstoffprotonen zufällig ausrichten.

Werden die Protonen einem starken Magnetfeld ausgesetzt, richten sich die Spins entlang oder entgegengesetzt zum statischen Magnetfeld B_0 aus, wobei die Ausrichtung entlang des Magnetfeldes energetisch günstiger ist und daher minimal überwiegt. Die Vektorsumme entlang des statischen Magnetfeldes B_0 wird als longitudinale Magnetisierung M_z bezeichnet. Wird ein Spin in ein Magnetfeld gebracht, wirkt auf seine Rotationsachse eine äußere Kraft, die zu einer Ausweichbewegung - der Präzessionsbewegung - führt. Diese Präzessionsbewegung erfolgt mit einer charakteristischen Frequenz (Lamorfrequenz) ν , die abhängig vom gyromagnetischen Verhältnis γ des Atomkerns und proportional zur Stärke des anliegenden Magnetfeldes B_0 ist.

$$\nu = \gamma B_0 \tag{2.1}$$

Die Präzessionsbewegung der Spins erfolgt jedoch ungeordnet und damit phaseninkohärent. Erst durch das Einstrahlen eines Hochfrequenzimpulses B_1 mit der passenden Lamorfrequenz

¹(Jezzard et al., 2001; Weishaupt et al., 2009)

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

gelangen die Spins kurzzeitig in Phasenkohärenz. Durch Aufnahme von Energie aus dem Hochfrequenzimpuls (HF-Impuls) verringert sich die Vektorsumme und die longitudinale Magnetisierung M_z nimmt ab. Gleichzeitig erzeugt der HF-Impuls ein rotierendes Magnetfeld orthogonal zu B_0 , wodurch die Gesamtmagnetisierung der Spins in xy -Richtung ausgelenkt wird. Das entstehende Magnetfeld wird als Transversal-Magnetisierung (M_{xy}) bezeichnet. Nach Abschalten des Hochfrequenzimpulses gelangen die Spins wieder in ihren Grundzustand. Sie relaxieren, d.h. die transversale Magnetisierung (M_{xy}) nimmt über die Zeit ab, während die longitudinale Magnetisierung (M_z) langsam zunimmt. Dabei geben die Spins die aufgenommene Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab, die von den Empfängerspulen des MR-Tomographen detektiert werden und die Grundlage für das MR-Signal bilden.

Es werden zwei Prozesse der Spinrelaxation unterschieden: die longitudinale Relaxation (T_1) und die transversale Relaxation (T_2). Beide Relaxationsarten zeigen einen exponentiellen Kurvenverlauf. Die longitudinale Relaxation ist abhängig vom Umgebungsmilieu sowie der Stärke des äußeren Magnetfeldes und wird durch die Geschwindigkeit der Energieabgabe der Spins an ihre Umgebung bestimmt. Aus diesem Grund wird sie auch als Spin-Gitterrelaxation bezeichnet. Die Zeitspanne, nach der $1/e$ (Eulersche Zahl) des Ausgangswerts der Longitudinal-Magnetisierung M_z erreicht sind (63%), wird als Zeitkonstante T_1 bezeichnet. Die transversale Relaxation ist durch den Verlust der transversalen Magnetisierung (M_{xy}) definiert, deren Ursache im Zerfall der Phasenkohärenz der Spins liegt. Nach Abschalten des HF-Impulses kommt es zur Dephasierung der Spins. Die lokalen Magnetfelder benachbarter Spins beeinflussen sich, so dass die Rotationsbewegung der Spins außer Phase gerät. Da hierbei Energie nur zwischen den Spins ausgetauscht wird, spricht man auch von Spin-Spin-Relaxation. Die Zeitkonstante, nach der die Transversal-Magnetisierung (M_{xy}) auf $1/e$ (37%) gesunken ist, wird als T_2 bezeichnet. Zudem beeinflussen lokale Inhomogenitäten des anliegenden Magnetfeldes B_0 die Dauer der transversalen Relaxationszeit. Verursacht durch den Magneten selbst und den zu untersuchenden Körper kommt es zu einer zusätzlichen Dephasierung. Der Zerfall der transversalen Magnetisierung erfolgt somit schneller als die Zeitkonstante T_2 und wird mit T_2^* bezeichnet.

Die beiden Relaxationszeiten T_1 und T_2 laufen gleichzeitig, aber voneinander unabhängig ab. Beide Zeitkonstanten sind gewebespezifisch und erlauben daher eine Kontrastierung der verschiedenen Gewebearten im MR-Bild. Hierbei ist die T_1 und T_2 -Relaxationszeit umso länger, je höher der Flüssigkeitsanteil im Gewebe ist. Je nach Einstellung der Parameter einer MR-Messequenz entstehen Bilder mit unterschiedlichem Gewebe-zu-Gewebe Kontrast.

Zur Erstellung eines MR-Bildes muss die zu messende Schicht mehrmals angeregt werden. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anregungen wird Repetitionszeit (*Time of repetition* (TR)) genannt. Wird eine kurze TR gewählt (unter 600 msec), beeinflusst vor allem T_1 den Bildkontrast. Die longitudinale Magnetisierung wird in Geweben mit kurzer T_1 -Relaxationszeit schnell erreicht, wodurch eine erneute Anregung dieser Strukturen zu einem starken MR-Signal

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

führt (sie erscheinen hell im Bild). Gewebe mit langen T_1 relaxieren langsamer und weisen nur ein geringes MR-Signal auf (sie erscheinen dunkel im Bild). Wird ein langes TR gewählt (größer als 1500 ms), haben alle Gewebearten genug Zeit zum Relaxieren und senden ein ähnliches Signal aus. Die T_1 -Gewichtung des Bildkontrastes ist nicht mehr möglich.

Eine weitere Zeitkonstante, die Echozeit TE bestimmt den Einfluss von T_2 auf den Bildkontrast. TE ist die Zeit, die man von der Anregung mittels Hochfrequenzimpuls bis zur Messung des MR-Signals vergehen lässt. Anders als die T_1 -Relaxation, die im Bereich von mehreren hundert Millisekunden erfolgt, verläuft die T_2 -Relaxation viel schneller und liegt für die verschiedenen Gewebearten im Bereich bis hundert Millisekunden. Wird TE so gewählt, dass sich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Geweben herausbilden können, also in einem Bereich von mehr als 30 msec (bei 3-Tesla), entsteht ein T_2 -gewichtetes Bild. Gewebe mit kurzem T_2 haben zu diesem Zeitpunkt die meiste Signalintensität verloren und erscheinen dunkel auf dem MR-Bild. Gewebe mit langem T_2 weisen zum Zeitpunkt TE noch eine hohe Signalintensität auf und erscheinen hell.

Das an den Empfangsspulen des Tomographen eingehende Signal des freien Induktionszerfalls muss zur Erzeugung eines MR-Bildes ortskodiert werden. Erst dadurch ist es möglich jedem Bildpunkt einen bestimmten Grauwert (=Signalintensität) zuzuordnen. Drei zusätzliche Magnetfeldgradienten sind hierfür notwendig. Zur Schichtselektion wird mittels einer zusätzlichen Magnetspule eine lineare ortsspezifische Inhomogenität des statischen Magnetfeldes B_0 aufgebaut. Entlang der z -Richtung (superior nach inferior) besitzt das Magnetfeld nun einen Anstieg (Gradient). Die Schichtdicke wird durch die Stärke des Gradienten bestimmt. Aufgrund der Abhängigkeit der Larmorfrequenz der Spins von der Magnetfeldstärke besitzt jede Schicht eine eigene Frequenz. Folglich wird ein Hochfrequenzimpuls mit der passenden Larmorfrequenz auch nur diese Schicht anregen, d.h. nur dort wird er mit den Spins in Resonanz treten und ihre Magnetisierung in die xy -Ebene kippen. Die Schichtposition wird somit durch die Änderung der Frequenzbandbreite des Hochfrequenzimpulses verändert.

Die Ortskodierung innerhalb einer Schicht erfolgt über eine Frequenz- und eine Phasenkodierung und wird durch das Schalten von Gradientenspulen in x - und y -Richtung realisiert. Zur Frequenzkodierung wird gleichzeitig mit der Signalaufnahme ein Gradienten bspw. entlang der x -Achse (links - rechts) angelegt. Dadurch präzidieren die Spins entlang des Gradienten mit unterschiedlicher Larmorfrequenz. Das empfangene Signal setzt sich aus der Summe aller gesendeten Frequenzen zusammen. Erst nach der Frequenzanalyse mittels einer Fourier-Transformation² liefert es die Informationen über die Herkunft des Signals aus der x -Richtung.

Nach Anregung der Spins mit dem HF-Impuls wird zudem kurzzeitig der Phasengradient

²**Fourier-Transformation:** Das empfangene Signal setzt sich aus einer Reihe von Sinusfunktionen mit je einer individuellen Frequenz und Amplitude zusammen. Mit Hilfe der Fourier-Transformation können alle in einem Signal enthaltenen Frequenzen und die dazugehörigen Amplituden identifiziert werden.

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

in y-Richtung (oben - unten) geschaltet. Dies bewirkt eine von der Stärke und der Dauer des Gradienten abhängige Phasenverschiebung der präzidierenden Spins gegeneinander. Nach Abschalten des Phasenkodiergradienten präzidieren die Spins wieder so schnell wie vor der Anregung. Der einmal erreichte Phasenvorsprung entlang des Gradienten bleibt hingegen erhalten. Jede Zeile in y-Richtung einer Schicht kann somit anhand ihrer Phase identifiziert werden. Da die Phasenverschiebung ein relativer Wert ist, müssen zur eindeutigen Bestimmung der Position die Messungen mit einer jeweils anderen, bspw. stärkeren Phasenkodierung wiederholt werden. Die Anzahl der wiederholten Phasenkodierungen bestimmt die Bildqualität, da die Phasenkodierung die Spaltenanzahl der Bildmatrix bildet. Aus der Stärke des Phasenkodiergradienten und den gemessenen Signalen kann mit Hilfe einer zweiten Fourier-Transformation die Phasenaufteilung berechnet werden. Aus diesen Informationen lässt sich für jedes Voxel³ der Bildmatrix ein Grauwert bestimmen. Dieser Grauwert codiert die aus der zweidimensionalen Fourier-Transformation berechnete Amplitude des empfangenen Signals und ist entsprechend der unterschiedlichen Signalstärke aus den verschiedenen Geweben heller oder dunkler.

Durch die Wahl geeigneter Messsequenzen wird eine Optimierung der Messdauer und des Bildkontrasts angestrebt. Nicht nur die Variation von TR und TE hat einen Einfluss auf den Bildkontrast, sondern auch der Einsatz verschiedener Pulssequenzen. So unterscheidet man bspw. Spinecho-Sequenzen (SE) von Gradientenecho-Sequenzen (GE). Bei der SE-Sequenz werden die Spins mit einem schichtselektiven 90° HF-Impuls angeregt. Daraufhin zerfällt die transversale Magnetisierung mit den Zeitkonstanten T_2 und T_2^* und die Spins dephasieren entsprechend der statischen Magnetfeldinhomogenitäten. Nach der Hälfte der Echozeit ($TE/2$) wird ein 180° Impuls gesendet, wodurch die Phasenreihenfolge der Spins umgekehrt wird. Da die Feldinhomogenitäten bestehen bleiben, holen die schneller präzidierenden Spins die langsameren ein. Infolgedessen steigt die Phasenkohärenz der Spins und damit das Signal wieder an und erreicht das Signalmaximum, bei dem sich alle Spins wieder in Phase treffen (Spinecho), nach weiteren $TE/2$.

Während sich die SE-Sequenz besonders gut zur Aufnahme von T_2 -gewichteten Bildern eignet, wird die Inversions-Recovery (IR)-Sequenz als eine Variante der SE-Sequenz vorwiegend für die Aufnahme T_1 -gewichteter Bilder genutzt. Bei der IR-Sequenz ist der SE-Sequenz ein 180° -Impuls vorangestellt. Dieser klappt die longitudinale Magnetisierung in die negative z-Richtung, ohne den Aufbau einer transversalen Magnetisierung. Der invertierte Längsmagnetisierungsvektor relaxiert durch die transversale Ebene in seine ursprüngliche Ausrichtung. Nach einiger Zeit der Relaxation wird der 90° -Impuls der SE-Sequenz eingestrahlt. Die Zeit zwischen den beiden Impulsen wird Inversionszeit (*Inversion time* (TI)) genannt.

³**Voxel:** Bezeichnung für einen dreidimensionalen Bild/Datenpunkt. Die hochauflösten anatomischen Datensätze werden mit einer Auflösung von $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ gemessen. Die funktionellen Daten der vorliegenden Arbeit erreichen eine Auflösung von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$.

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

Eine weitaus schnellere Methode zur Bildaufnahme bietet die Gradientenecho-Sequenz (GE). Mit einem Hochfrequenzimpuls kleiner als 90° werden zu Beginn der Messung die Spins aus der z -Richtung ausgelenkt. Der kleine Winkel führt zu kürzeren Relaxationszeiten. Das nun folgende Schalten des Frequenzcodiergradienten mit negativer Polarität führt dazu, dass die Spins zusätzlich zur Querrelaxation dephasieren. Anschließend wird der Gradient auf positive Polarität umgeschaltet und bewirkt, dass die Spins wieder in Phase gelangen. Dies bewirkt einen erneuten Anstieg des Signals, das Gradientenecho.

Eine GE-Sequenz, die sich sehr gut zur schnellen Aufnahme eines dreidimensionalen anatomischen Bildes des Gehirns eignet, ist die MPRAGE-Sequenz (*magnetization-prepared rapid acquisition gradient echo*). Zu Beginn wird wie in einer IR-Sequenz die longitudinale Magnetisierung durch einen 180° -Impuls in die negative z -Richtung gekippt. Im Anschluss folgt eine GE-Sequenz. Aufgrund des kurzen TR werden sehr kleine Kippwinkel verwendet (von bspw. 8°). Somit erhält man mit dieser Sequenz in relativ kurzer Zeit hoch-aufgelöste T_1 -gewichtete 3D-Bilder.

Für die funktionelle Bildgebung sind EPI-Sequenzen (*echo-planar imaging*) mit besonders schneller Akquisitionszeit von Vorteil. Zur Bildaufnahme wird der Frequenzgradient wiederholt mit wechselndem Vorzeichen hin- und hergeschaltet, so dass ein Echozug aus bis zu 128 Echos erzeugt wird. Mit dieser Methode kann mit einer einzigen Anregung in unter 100 msec eine Schicht gemessen, d.h. ein Bild aufgenommen werden. Da Feldinhomogenitäten mit der EPI-Sequenz nicht ausgeglichen werden können, erfolgt der Signalabfall mit T_2^* . Zur Aufnahme des Echos bleibt nur wenig Zeit, weshalb starke und schnelle Gradienten eingesetzt werden. Diese wiederum führen zu weiteren Inhomogenitäten und zu einer erhöhten Lautstärkebelastung, so dass zu untersuchende Personen einen Gehörschutz tragen müssen.

2.1.2 Prinzip der funktionellen Magnetresonanztomographie ⁴

Mittels der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) kann auf indirektem Weg die neuronale Aktivität des Gehirns gemessen werden. Steigt die Aktivität aufgrund funktioneller Beanspruchung, erhöht sich der Energieverbrauch der Zellen, d.h. die Neuronen benötigen mehr Glukose und Sauerstoff. Als Ausgleich steigt in den entsprechenden Regionen nach ca. 2-3 Sekunden der Blutfluss an. Das zugeführte Blut enthält mehr Sauerstoff als notwendig, so dass selbst nach Entnahme des Sauerstoffs durch die aktiven Neurone mehr sauerstoffreiche Anteile im Blut vorhanden sind als bei spontaner Aktivität der Neurone. Diese Veränderung des Sauerstoffanteils im Blut, auch BOLD (*blood oxygenation level dependency*)-Effekt genannt, bildet die Grundlage der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Der Träger des Sauerstoffs im Blut, das eisenhaltige Hämoglobinemolekül, bestimmt abhängig von seiner Sauerstoff-

⁴(Faro & Mohammed, 2006; Heeger & Ress, 2002; Jezzard et al., 2001; Savoy, 2001)

2.1 Grundlagen der MR-Bildgebung

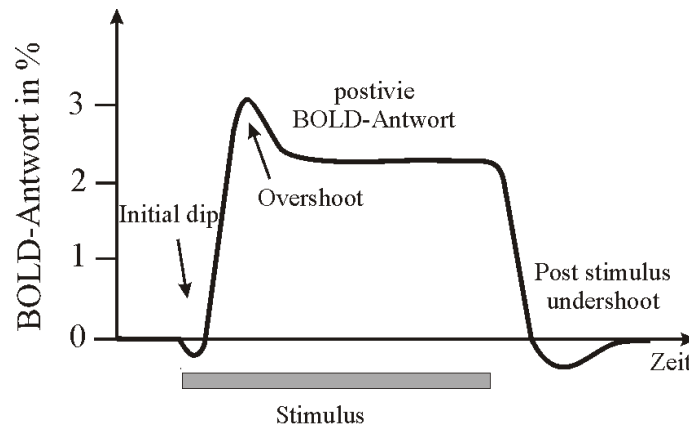


Abbildung 2.1: Schematischer Verlauf der BOLD-Antwort nach Jezzard et al. (2001)

sättigung die magnetischen Eigenschaften des Blutes. Sauerstoffarmes Blut enthält vor allem desoxygeniertes Hämoglobin, das aufgrund seiner paramagnetischen Eigenschaften zu Inhomogenitäten im benachbarten Magnetfeld führt. Sauerstoffreiches Blut besteht zu einem größeren Anteil aus oxygeniertem Hämoglobin, dessen diamagnetische Eigenschaften das benachbarte Magnetfeld nur gering beeinflussen. Eine Zunahme an oxygeniertem Hämoglobin führt daher zu einem verlangsamten Zerfall der Quermagnetisierung, wodurch T_2^* verlängert wird und die Signalintensität ansteigt. Der zeitliche Verlauf der BOLD-Antwort lässt sich wie folgt charakterisieren: Bedingt durch den erhöhten Sauerstoffbedarf der Zellen kommt es zu Beginn der Stimuluspräsentation innerhalb von einer halben bis einer Sekunde prinzipiell zu einer geringen Abnahme der Signalintensität (*initial dip*) (siehe Abbildung 2.1.). Mit dem Anstieg des Blutflusses und des Blutvolumens in den Kapillaren erhöht sich der Anteil an oxygeniertem Blut. Das Signal steigt zwischen der fünften und achten Sekunde bis zu einem Maximalwert (*overshoot*) an und sinkt dann auf ein konstantes Niveau. Nach Beendigung der Stimulation fällt das BOLD-Signal ab und unterschreitet (*undershoot*) oftmals kurzzeitig sein Ausgangsniveau. Die Ursache für den *undershoot* liegt im Verhältnis des noch hohen Blutvolumens zu dem nun geringeren Blutzufluss.

Während einer T_2^* -gewichteten Messung (EPI) können durch Vergleich der unterschiedlichen experimentellen Bedingungen die Regionen mit erhöhter Sauerstoffzufuhr lokalisiert werden. Für eine statistische Auswertung müssen die experimentellen Bedingungen und die Kontrollbedingung vielfach wiederholt werden. Zudem muss das Experimentaldesign Ruhephasen beinhalten, in denen das BOLD-Signal auf das Ausgangsniveau zurückkehren kann. Zwei unterschiedliche Herangehensweisen haben sich etabliert. Im Blockdesign werden im Wechsel über einen Zeitraum von 20-30 s die Stimuli einer Experimentalbedingung dargeboten, gefolgt von einer ebenso langen Ruhephase und der Präsentation einer Kontrollbedingung. Im ereigniskorrelierten Design werden die Stimuli dagegen einzeln präsentiert, unmittelbar gefolgt von einer Ruhephase von 10-12 s, in der das BOLD-Signal vor der erneuten Stimuluspräsentation auf

sein Ausgangsniveau zurückkehren kann. Wird der Abstand der Stimuli nicht konstant gehalten, sondern variiert bspw. alle 6-10 s (d. h. der Abstand wird gejittert), ist es möglich die Ruhephasen zu verkürzen und somit die Messzeit herabzusetzen. Während im Blockdesign und im einfachen ereigniskorrelierten Design Referenzfunktionen (bspw. eine 2-Gammafunktion) zur Korrelationsanalyse mit dem gemessenen BOLD-Verlauf in einem Voxel genutzt werden, wird bei einer gejitterten Stimuluspräsentation eine Deconvolution-Analyse unter Verwendung eines komplexen linearen Modells berechnet. Diese Methode wird im Abschnitt Datenanalyse 2.4 näher beschrieben.

2.2 Datenerhebung fMRT

Die fMRT-Experimente wurden in einem 3-Tesla-Magnetresonanztomographen (Siemens Trio, Erlangen, Deutschland) durchgeführt. Die Probanden wurden mit einer 8-Kanal-Kopfspule gemessen, dazu lagen sie möglichst bequem auf der Geräteliege. Um Bewegungsartefakte zu vermeiden, wurde ihr Kopf innerhalb der Kopfspule fixiert. Aufgrund der Lautstärkeentwicklung durch die Gradientenschaltungen von bis zu 90 dB trugen alle Probanden während der Messung Gehörschutzstopfen. Die Präsentation der akustischen Stimuli erfolgte binaural in Monophonie über MR-kompatible elektrodynamische Kopfhörer (MR confon, Magdeburg, Baumgart et al. (1998)) mit integrierter Schallschutzkapsel. Visuelle Stimuli wurden über einen Projektor auf einen Bildschirm am Kopfende der Geräteliege projiziert und über ein Spiegelsystem innerhalb des Scanners dem Probanden sichtbar gemacht. Zur Präsentation der Stimuli und zur Aufzeichnung der behavioralen Antworten der Probanden wurde das Programm Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, USA) verwendet.

Vor Beginn eines jeden Experiments wurden die Probanden schriftlich über den Ablauf und die Aufgabenstellung des Experiments informiert. Zum besseren Verständnis der Aufgabenstellung wurde ihnen eine Auswahl an charakteristischen akustischen Stimuli präsentiert. Nach der Lagerung der Probanden im Scanner wurde in einer ersten Messung die exakte Kopfposition bestimmt. Hierfür wurden drei Orientierungsmessungen von je 9,2 s für jede Raumrichtung (axial, koronal, sagittal) durchgeführt. Es folgte die Aufnahme eines hoch aufgelösten, T_1 -gewichteten Datensatzes mit einer MPRAGE-Sequenz (192 axial ausgerichtete Schichten, Schichtdicke = 1 mm isotrope Auflösung, Sichtfeld = $256 \times 256 \text{ mm}^2$, Voxelgröße = $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$, TR = 2500 ms, TE = 4,77 ms, TI = 1100 ms, Dauer = 9 min 20 s). Dieser Datensatz ermöglicht die Rekonstruktion der individuellen Hirnanatomie. Vor den weiteren Messungen wurde die Lautstärke der akustischen Stimuli angepasst, so dass sie ausreichend laut und auf beiden Ohren gleich laut präsentiert wurden. Ebenfalls überprüft wurden die Taster zur Eingabe der Antwort des Probanden. Aufgrund der Aufzeichnung der Tastendruckdynamik in Studie II wurde hier zusätzlich eine Justage der Taster nötig (siehe Messung

2.3 Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten

der Tastendruckdynamik 2.5). Anschließend folgte die Aufnahme eines T_1 -gewichteten, anatomischen, zweidimensionalen Datensatzes mittels einer IR-EPI-Sequenz (TR = 20000 ms, TE = 34 ms, TI = 1450 ms). Die Ausrichtung der Schichten dieses Datensatzes entsprach den Verhältnissen während der nachfolgenden funktionellen Messung und ermöglicht daher die Darstellung der anatomischen Bilder mit den gleichen Verzerrungen wie sie durch die funktionelle Messung entstehen. Zum Schluss folgte die T_2^* gewichtete GE-EPI-Sequenz (32 axial orientierte Schichten, Schichtdicke = 3 mm, Schichtabstand = 0,3 mm, Sichtfeld = $192 \times 192 \text{ mm}^2$, Matrix = 256×256 Voxel, Voxelgröße = $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, TR = 2000 ms, TE = 30 ms, TI = 62 ms, Pulswinkel = 80°). Die Ausrichtung der Schichtführung wurde so gewählt, dass nahezu das gesamte Großhirn erfasst wurde.

2.3 Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten

Die Verarbeitung und statistische Analyse der MRT-Daten erfolgte mit dem Programm BrainVoyager QX Version 1.10.4 (Brain Innovation, Maastricht, Niederlande). Nach dem Einlesen der anatomischen 3D-Daten wurden diese mittels einer Interpolation mit einer *sinc*-Funktion in den Talairach-Raum überführt. Sechs äußere Punkte des Gehirns sowie die anteriore und posteriore Kommissur dienen hierbei als Fixpunkte um durch Stauchung und Streckung die individuelle Hirnanatomie an den stereotaktischen Talairach-Raum anzupassen (Talairach & Tournoux, 1988).

Die Vorverarbeitung der funktionellen Daten erfolgte mit der in BrainVoyager QX vorgegebenen Standardsequenz aus Schichtscanzeitkorrektur (*sinc*-Interpolation), 3D-Bewegungskorrektur (*trilinear-sinc*-Interpolation), lineare Trendbereinigung und einer zeitlichen Filterung mit einem Hochpassfilter von $1,81 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ (zwei Zyklen pro Scan). Die funktionellen Daten wurden räumlich mit einem Gauß-Filter von 4 mm geglättet (*full width at half maximum*).

Aus der Berechnung der Bewegungskorrektur kann die Stärke der Bewegung des Probanden während der Messung (Translation und Rotation in die drei Raumrichtungen) ausgelesen werden. Datensätze mit mehr als 3 mm Translation bzw. 2° Rotation wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Probanden, die sich zu oft und zu stark sprunghaft bewegt haben. Ein Sprung wurde als die Bewegung von mehr als 0,5 mm oder $0,5^\circ$ von einem Volumen zum nächsten definiert. Wenn die Summe der Sprünge in allen drei Raumrichtungen einen Wert von 1° bzw. 1 mm überschritt, wurde der Datensatz ausgeschlossen.

Die anatomischen 2D-Daten werden auf den funktionellen 2D-Datensatz projiziert. Anschließend wurden beide 2D-Datensätze auf den anatomischen 3D-Datensatz koregistriert und mit diesem Schritt in den 3D-Talairach-Raum überführt. Anhand dieser Vorverarbeitungsschritte lässt sich die resultierende Aktivierung der funktionellen Messung gut im 3D-Raum lokalisieren.

2.4 Analyse der fMRT-Daten

Für die weitere Analyse der funktionellen Daten mit BrainVoyager QX Version 1.10.4 (Brain Innovation, Maastricht, Niederlande) wurden aus der zeitlichen Abfolge der Experimentalbedingungen und den aufgezeichneten Verhaltensdaten Experimentalprotokolle erstellt. Diese ermöglichen den statistischen Vergleich der einzelnen Experimentalbedingungen untereinander. Während das Protokoll in Studie I aufgrund des Blockdesigns für alle Probanden gleich ist, wurde für die fMRT-Experimente in Studie II und III pro Proband ein individuelles Protokoll erstellt, welches eine Einteilung der Experimentalbedingungen entsprechend der Korrektheit der Antworten erlaubt. Durchgänge, in denen die Probanden zu langsam antworteten, wurden in diesem Protokoll separat aufgeführt und von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Mittels eines allgemeinen linearen Modells wurden für jeden Probanden Aktivierungskarten berechnet. In Studie I wurde der erwartete hämodynamische Signalverlauf mit Hilfe einer 2-Gamma-Funktion modelliert. In den Studien II und III wurde eine Deconvolution-Analyse berechnet. Diese wurde notwendig aufgrund des gewählten Studiendesigns, bei dem nach der Präsentation der Stimuli nicht auf die Rückkehr der BOLD-Antwort auf ein Ruhenniveau gewartet wurde, sondern in Abständen von 6s, 8s und 10s weitere Stimuli präsentiert wurden. Daher überlagern sich die BOLD-Antworten auf verschiedene Stimuli zu einem bestimmten Messzeitpunkt t , sodass sich kein typischer BOLD-Verlauf ergibt. Dies wird bei der Deconvolution-Analyse durch die Verwendung eines linearen Modells berücksichtigt: $y = X\beta + \epsilon$

Hierbei beschreibt die Variable y den gemessenen Grauwertverlauf für die Messzeitpunkte t . Pro Bedingung wurden jeweils 10 Messzeitpunkte (Prädiktoren) festgelegt. X bildet die Designmatrix mit den Einträgen 0 oder 1 ab, die das Verhältnis zwischen Stimuluspräsentation und beobachtetem Signalverlauf beschreibt. Da für jede Bedingung 10 Prädiktoren (18s) definiert werden, ergibt sich die Spaltenanzahl (Größe) der Designmatrix X aus der Anzahl der Bedingungen $n \times$ Anzahl der Prädiktoren (je 10 pro Bedingung) und der konstanten Baseline k , dem mittleren Grauwert. Die Beziehung zwischen y und X und dem Fehlerterm ϵ wird anhand der β -Werte geschätzt. In der Deconvolution-Analyse wird der Signalverlauf also nicht mittels einer festen Funktion (bspw. der 2-Gamma-Funktion) modelliert, sondern flexibel und adaptiv aus den Daten geschätzt. Basierend auf den Zeitpunkten t der Stimuluspräsentation wird die hämodynamische Antwortfunktion unter der Annahme der Linearität und einer endlichen Anzahl an Prädiktoren (hier 10) modelliert. Das Maximum der hämodynamischen Antwort wird 6 bis 10 Sekunden nach Stimulusbeginn erreicht. Der statistische Vergleich der verschiedenen Bedingungen untereinander beruht daher auf den Messzeitpunkten vier und fünf, d.h. 6 bis 10 Sekunden nach Stimulusbeginn. Die berechneten Kontraste werden in den Abschnitten zur Datenanalyse der drei Experimente ausführlich beschrieben.

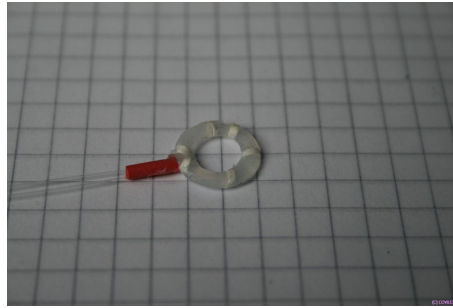


Abbildung 2.2: Lichtwellenleiter der Tastersensorik (COVILEX® LWL Sensor)

2.5 Messung der Tastendruckdynamik

Die dynamische Messung der Tastendruckdynamik wurde unter Verwendung der COVILEX - ResponseBox 2.0 (COVILEX ® GmbH, Magdeburg, Deutschland) realisiert. Die Methode bietet die Möglichkeit, die Intensität und die Dauer eines Tastendrucks aufzuzeichnen und aus den gewonnenen Daten das Antwortverhalten der Probanden zu analysieren. Der Handapparat, bestehend aus zwei Tastern für Zeige- und Mittelfinger, ist mit einem Lichtwellenleiter verbunden. Abbildung 2.2 zeigt den Lichtwellenleiter in Form eines Rings, dessen Lichtsignale durch die definierte mechanische Verformung moduliert werden. Über den Lichtleiter wird dann die Tasterposition ausgelesen (Naumann, 2007; Wolfram, 2007). Der Aufbau ermöglicht die Verwendung des Tasters im Magnetresonanztomographen.

Über einen Parallelport (8 Bit) werden die Werte des Tastendrucks mit einer Auflösung von 128 Schritten, die durch einen 7-Bit-Wert repräsentiert werden, an die Elektronikeinheit der ResponseBox übermittelt. Der Wertebereich für den Tastendruck umfasst daher Werte von Null bis 127, wobei Null das Nicht-drücken codiert und ein Wert von 127, dass der Taster vollständig gedrückt wurde. Der achte Bit-Wert codiert, welcher der beiden Taster gedrückt wird. Die Abtast-rate beträgt 500Hz. Das verwendete Experimentaldesign der vorliegenden Arbeit bedingt, dass die beiden Taster während des Experimentalverlaufs nie gleichzeitig gedrückt wurden. Sobald sich Änderungen im Tastenwert ergaben, wurden diese über den Parallelport an die Elektronikeinheit weitergereicht. Die Werte wurden in einer log-Datei gespeichert und zur Analyse in Excel (Microsoft®Office Excel®2007) eingelesen. Im Anschluss erfolgte die statistische Auswertung mit dem Programm SPSS (PASW Statistics).

2.6 Messung des Pupillendurchmessers

Das rechte Auge der Probanden wurde während des fMRT-Experiments der Studie II (siehe Abschnitt 4.2, Seite 55) mittels eines MR-tauglichen Infrarot-Aufnahme-Systems (Kanowski et al., 2007) gefilmt. Die Linse des verwendeten optischen Systems war am Ende eines nicht-magnetischen Endoskops eingebaut (COVILEX ® GmbH, Magdeburg), welches an der Kopfspule des MR-Tomographen mit einem Abstand von 3 bis 4 cm vom Auge des Probanden befestigt wurde. Über ein flexibles optisches Kabel war das Endoskop mit einer Kamera verbunden. Diese infrarot-sensitive Kamera befand sich außerhalb des Magneten an der Decke des Untersuchungsraums in einem elektrisch abgeschirmten Gehäuse. Zwei Infrarotleuchten (je mit einer 50 W PAR20 Halogenbirne und einem 850 nm Filter) dienten als Lichtquelle. Diese waren an der Wand hinter dem Magneten befestigt und beleuchteten den Projektionsschirm am Kopfende des MR-Tomographen, der zur visuellen Präsentation der Stimuli eingesetzt wurde. Durch den Projektionsschirm wird zudem garantiert, dass die Infrarotstrahlung unterhalb der Sicherheitsgrenze liegt und das Auge des Probanden durch das diffuse Licht auch bei Dunkelheit für die Kameraaufnahme ausreichend beleuchtet wird (Kanowski et al., 2007). Das Video-Signal der Kamera wurde mittels eines einfachen Videorecorders aufgezeichnet und gleichzeitig auf DVD archiviert.

Drei Probanden wurden nicht gefilmt, da sie eine MR-taugliche Brille zum Ausgleich der verminderten Sehstärke trugen, die die Qualität der Aufnahme beeinträchtigt hätte. Das Datenmaterial wurde nach dem Experiment gesichtet und Videos mit schlechter Qualität aussortiert. Dies betraf vor allem Probanden, die zu starke Augenbewegungen zeigten ($N = 7$), zu viel blinzelten ($N = 5$) oder während des Experiments ermüdeten (häufiges Schließen der Augen $N = 4$). Ausgeschlossen wurden außerdem Probanden, die das Kriterium der zugelassenen Bewegung während der MRT-Messung (siehe Abschnitt 2.3) überschritten ($N = 13$). Für die verbleibenden 28 Probanden wurde manuell überprüft, ob die verwendeten Stimuli zu Veränderungen der Pupillenweite führen. Zusätzlich wurde das Blinzelverhalten der Probanden untersucht (siehe Abschnitt 4.2.7, Seite 60).

2.7 Allgemeines Stimulusdesign

In allen fMRT-Experimenten hatten die Probanden die Aufgabe, per Tastendruck mit Zeige- bzw. Mittelfinger der rechten Hand zu entscheiden, ob der jeweils präsentierte Ton in seiner Frequenz aufwärts oder abwärts moduliert war. Mit dem Zeigefinger kennzeichneten sie aufwärts modulierte Töne und mit dem Mittelfinger Töne mit einer Abwärts-Modulation. Die Schwierigkeit der dargebotenen frequenzmodulierten (FM) Töne variierte zwischen und innerhalb der Experimente entsprechend des Modulationsfaktors (k) und der Dauer (Δt in s). Mit Hilfe der

2.8 Probanden

nachfolgenden Gleichung wurden die Werte (X) zur Bestimmung der Anfangs- und Endfrequenz eines FM-Tons berechnet:

$$X = \text{Mittelfrequenz} * \Delta t/k \quad (2.2)$$

Die FM-Töne wurden mit matlab (The MathWorks, Inc., USA) erzeugt.

In allen Experimenten schauten die Probanden während der Präsentation der akustischen Stimuli auf einen grauen Bildschirm mit weißem Fixationskreuz. In den Experimenten mit einer visuellen Rückmeldung des Systems wurde das Fixationskreuz zum Zeitpunkt der Rückmeldung durch die visuelle Rückmeldung ersetzt. In allen fMRT-Experimenten erhielten die Probanden eine Rückmeldung des Systems, die ihre Eingabe bestätigte. In einer Hälfte des fMRT-Experiments der Studie I und in Studie II informierte die Rückmeldung zusätzlich über die Korrektheit der Antwort.

2.8 Probanden

An den Experimenten nahmen rechtshändige Personen (Edinburgh Handedness Inventory Oldfield (1971)) mit normaler oder korrigierter Sehschärfe und normaler Hörfähigkeit teil. Die Hörfähigkeit wurde durch die Messung der audiometrischen Schwelle bestimmt. Vor den Experimenten wurden die Probanden über die Methode der Magnetresonanztomographie und deren mögliche Risiken informiert. Sie gaben ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme am Experiment und wurden im Anschluss an das Experiment finanziell entschädigt. Die Durchführung der Studien wurde von der Ethikkommission der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg genehmigt.

Teil II

Experimente

3 Studie I: Modalität und Informationsgehalt von Rückmeldungen

3.1 Einleitung

Rückmeldungen in der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation können auf verschiedenen sensorischen Kanälen übertragen werden, sowohl verbal und paraverbal als auch über Gestik und Mimik. Ebenso werden in der Kommunikation mit technischen Systemen verschiedene sensorische Modalitäten verwendet, um mit dem Nutzer in Kommunikation zu treten. Visuelle Rückmeldungen bilden zur Zeit die geläufigste Form der Feedbackpräsentation (Perrin et al., 2008). Aber auch auditive Rückmeldungen sowie Kombinationen aus visuellen und auditiven Signalen kommen zur Anwendung. Mit der Entwicklung der Sprachausgabe von technischen Systemen ist man zudem in der Lage, verbale Rückmeldungen zu präsentieren.

Für einen spezifischen Interaktionskontext sind spezifische Ausgabemodalitäten zu bevorzugen (Kong et al., 2011). Dieser Interaktionskontext wird nach Kong et al. (2011) durch drei Entitäten definiert. Einerseits ist die gewählte Ausgabemodalität abhängig von den gegebenen Umweltbedingungen wie der Umgebungslautstärke oder der Helligkeit, andererseits spielt der Nutzer mit seinen vielschichtigen sensorischen und mentalen Fähigkeiten sowie persönlichen Erfahrungen eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der passenden Ausgabemodalität. Dass sowohl die bevorzugte Eingabe an das System als auch die Ausgabe durch das System stark vom Individuum abhängen, zeigen die Ergebnisse von Schüssel et al. (2012). So fanden sie beispielsweise eine geschlechtsspezifische Tendenz zur Nutzung von Sprache. Im Vergleich zu Männern nutzen Frauen diese Modalität seltener, wenn sie mit einem multimodalen System interagieren. Letzten Endes hat auch die Art der technischen Umsetzung des Systems einen Einfluss auf die Präferenz einer Ausgabemodalität (Kong et al., 2011). Eine allgemeine Empfehlung welche Ausgabemodalität zu bevorzugen ist, existiert daher nicht.

Für die Experimente der vorliegenden Arbeit standen drei Modalitäten der Rückmeldung zur Auswahl: Visuelle Rückmeldungen in Form von einfachen Zeichen (Kreis, Häkchen, Kreuz), auditorische Rückmeldungen in Form von Sinustönen (mit unterschiedlich hohen Frequenzen)

3.1 Einleitung

und verbale Rückmeldungen („okay“, „richtig“, „falsch“). Die vom System gestellte auditorische Kategorisierungsaufgabe wurde von den Probanden durch eine Eingabe per Tastendruck gelöst. Anhand der Reaktionszeiten und der Fehlerrate der Probanden sollte in der Studie I geklärt werden, welche Modalität das gewählte Aufgabendesign bestmöglich unterstützt. Außerdem bewerteten die Teilnehmer der Studie in einer Nachbefragung die verschiedenen Rückmeldungen und gaben die subjektiv bevorzugte Modalität der Rückmeldung an. Sowohl die verbale Rückmeldung als auch die visuelle Rückmeldung beinhaltet eine Semantik, die auch außerhalb des experimentellen Kontexts gültig ist. Die Bedeutung der Sinustöne musste dagegen vor dem Experiment gelernt und während des Experiments erinnert werden. Möglicherweise beansprucht im vorliegenden Experiment diese Art der Rückmeldung die Probanden stärker als visuelle und verbale Rückmeldungen. Die Aufzeichnung der fMRT-Daten soll zusätzlich herangezogen werden, um mögliche Unterschiede in der Aktivierung durch die verschiedenen Modalitäten der Rückmeldung aufzudecken.

Neben der Modalität der Rückmeldung steht in Studie I der Informationsgehalt der Rückmeldungen im Mittelpunkt der Untersuchung. Den Probanden wurden sowohl registrierende Rückmeldungen präsentiert, die nur die Eingabe des Probanden bestätigen („Empfangsbestätigung“, siehe Seite 4), als auch bewertende Rückmeldungen, die die Korrektheit des Tastendrucks anzeigen.

Die Studien von Behne et al. (2008) und Kohrs et al. (2012) bestätigen, dass während einfacher Mensch-Computer-Interaktionen zeitlich korrelierte registrierende Rückmeldungen notwendig sind, um eine Dialogsituation zwischen Nutzer und System aufzubauen. Die Studien zeigen, dass diese einfache Form der Rückmeldung zu einer Aktivierung des Belohnungssystems innerhalb des Striatums führt, während unkorrelierte Rückmeldungen in diesen Hirnregionen keine Aktivierung hervorrufen (Behne et al., 2008). In unzähligen Studien zum Belohnungssystem wird dagegen davon ausgegangen, dass vor allem positive Rückmeldungen und darüber hinaus belohnende Rückmeldungen bspw. in Form von finanziellen Anreizen diese Hirnregion aktivieren. Neutrale (registrierende) Rückmeldungen dienten in diesen Studien nur als Kontrollbedingung und wurden nur im Vergleich mit positiven und negativen Rückmeldungen analysiert (Delgado, 2007; Knutson & Cooper, 2005; Nieuwenhuis et al., 2005b; O’Doherty, 2004).

In Studie I sollte daher untersucht werden, inwieweit bewertende Rückmeldung einen Mehrwert für den Dialogverlauf darstellen und welche neuronalen Korrelate diesem Mehrwert zugrunde liegen. Das Lösen der auditorischen Kategorisierungsaufgabe spiegelte eine einfache Mensch-Computer-Interaktion wider, deren Komplexität auf ein Minimum von drei Aktionen (FM-Ton, Tasteneingabe, Rückmeldung) begrenzt wurde. Aufgrund der Einfachheit der Interaktion wurde im gewählten Szenario von einem „erfahrenen“ Nutzer ausgegangen, für den das Lösen der Aufgabe eine wiederkehrende Routine darstellt. Über ein internes Fehlermonitoring sollten die Probanden in der Lage sein, ihr Verhalten einzuschätzen. Registrierende

Rückmeldungen bestätigten ihnen nur, dass ihre Eingabe vom System empfangen wurde. Aufgrund fehlender Informationen über die tatsächliche Korrektheit ihrer Eingabe bleibt ihr Handeln jedoch während registrierender Rückmeldungen ohne ersichtliche Konsequenz. Bewertende Rückmeldungen sollten dagegen mehr Aufmerksamkeitsressourcen des Probanden auf die zu lösende Aufgabe lenken, da sie zusätzliche Information über die Korrektheit der Eingabe beinhalten. Zudem wurden die Probanden vor Beginn des Experiments instruiert, so korrekt wie möglich zu antworten. Mögliche Auswirkungen auf das Verhalten der Nutzer wurden anhand der Reaktionszeit und der Fehlerrate während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen überprüft.

3.2 Hypothesen

Folgende Hypothesen werden für die Verhaltensdaten aufgestellt:

- (a) Die Reaktionszeiten weisen signifikante Unterschiede zwischen den Modalitäten der Rückmeldungen auf, wobei auditive Rückmeldungen aufgrund ihrer neu erlernten Semantik zu längeren Reaktionszeiten führen als visuelle Rückmeldungen.
- (b) Die Reaktionszeiten der Probanden sind im Experimenterteil mit bewertenden Rückmeldungen signifikant kürzer als im Teil mit registrierenden Rückmeldungen.
- (c) Die Fehlerrate weist einen signifikanten Unterschied zwischen dem Experimenterteil mit registrierenden Rückmeldungen und dem Teil mit bewertenden Rückmeldungen auf.

Für die neurophysiologischen Daten werden folgende Hypothesen formuliert:

- (a) Unabhängig von der Modalität aktivieren bewertende Rückmeldungen die Hirnregionen des Belohnungssystem stärker als registrierende Rückmeldungen.
- (b) Bewertende Rückmeldungen führen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen zu einer stärkeren Aktivierung in den jeweiligen sensorischen Arealen der ausgewählten Modalität.

3.3 Material und Methode

3.3.1 Probanden

Am Experiment nahmen 24 Probanden teil. Sieben Datensätze konnten aufgrund von Bewegungsartefakten (siehe Abschnitt 2.3) nicht in die Analyse einfließen. Das Durchschnittsalter der in der Auswertung verbleibenden 17 Probanden (8 weiblich, 9 männlich) betrug $25,9 \pm 3,0$ Jahre.

3.3.2 Stimuli und Aufgabe

Das Experiment ist in zwei funktionelle Messungen aufgeteilt, die sich im Informationsgehalt der präsentierten Rückmeldung unterscheiden. Die eine Hälfte der Probanden erhielt zuerst neutrale registrierende Rückmeldungen und im Anschluss bewertende Rückmeldungen, die über die Korrektheit der Eingabe informierten. Die andere Hälfte der Probanden durchlief das Experiment in umgekehrter Reihenfolge. Die Präsentation der Stimuli erfolgte im Blockdesign. Beginnend und endend mit einem Ruheblock, wurden im regelmäßigen Wechsel Ruheblöcke (20 s) und pseudorandomisiert Stimulusblöcke (32 s) dargeboten. Die Stimulusblöcke unterschieden sich in der Modalität der Rückmeldung und enthielten visuelle Rückmeldungen, einfache akustische Rückmeldungen oder verbale Rückmeldungen. Die im Experiment dargebotenen FM-Töne hatten eine Dauer von 400 ms und wurden mit einem Faktor von $k = 2$ und $k = 4$ moduliert (siehe Abschnitt 2.7). Die Mittenfrequenz lag im Bereich von 700 Hz bis 3800 Hz und unterschied sich von Ton zu Ton um 100Hz. Innerhalb eines Blocks wurden 16 Töne mit einem Abstand von 2s präsentiert. Als Bestätigung ihres Tastendrucks wurde den Probanden pseudorandomisiert je nach Stimulusblock eine Rückmeldung in einer der drei Modalitäten dargeboten. Die verschiedenen Arten der Rückmeldung sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die visuellen Rückmeldungen wurden mit einer Dauer von 500 ms dargeboten, die akustischen Rückmeldungen in Form von Sinustönen mit einer Dauer von 500 ms. Die Dauer der verbalen Rückmeldungen betrug im Mittel $569 \text{ ms} \pm 27,5 \text{ ms}$.

3.3.3 Datenerhebung

Die Erhebung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Aufgrund der Zweiteilung des Experiments wurde nach der ersten Hälfte des Experiments erneut eine IR-EPI-Sequenz gemessen und anschließend die zweite funktionelle Messung mittels der GE-EPI-Sequenz aufgenommen. Für jeden Probanden liegen daher zwei anatomische Datensätze und zwei funktionelle Datensätze vor. Die Dauer der funktionellen Messung beträgt 42 min 16 s. Pro Teilerperiment wurden 634 Volumen in 21 min 8 s aufgenommen.

Tabelle 3.1: Modalitätsabhängige Rückmeldungen

Modalität	registrierende Rückmeldungen	bewertende Rückmeldungen	
		positiv	negativ
visuell	O	✓	✗
akustisch	Sinuston 330 Hz	hoher Sinuston 440 Hz	tiefer Sinuston 220 Hz
verbal	„okay“	„ja“	„nein“

3.3.4 Datenvorverarbeitung

Die Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

3.3.5 Datenanalyse

fMRT-Daten

Für die weitere Analyse der funktionellen Daten mit BrainVoyager QX wurden aus der zeitlichen Abfolge der Experimentalbedingungen für die zwei funktionellen Datensätze je ein Experimentalprotokoll erstellt. Diese ermöglichen den statistischen Vergleich der einzelnen Experimentalbedingungen untereinander. Aufgrund des Blockdesigns ist das Protokoll im vorliegenden Experiment für alle Probanden gleich. Mittels eines allgemeinen linearen Modells wurden für die zwei Datensätze jedes Probanden Aktivierungskarten berechnet. Der erwartete hämodynamische Signalverlauf wurde mit Hilfe einer 2-Gamma-Funktion modelliert. Um Artefakte aus Regionen mit zu geringer Signalintensität auszuschließen, wurden nur die Voxel in die Analyse aufgenommen, deren funktionelles EPI-Signal einen Grauwert von mindestens 75 aufwies. Die Datensätze der einzelnen Probanden mit den individuellen statistischen Karten über die geschätzten Effekte (β -Werte) wurden für die weitere statistische Analyse zusammengeführt und in einer *Random effects* (RFX)-Analyse ausgewertet. Innerhalb dieses Rechenschritts wird für den gewählten Kontrast eine Serie von separaten allgemeinen linearen Modellen (*General Linear Model* (GLM)) der einzelnen Probanden berechnet (*first-level analysis*). Der resultierende Mittelwert dieser Analyse wird mittels *t*-Test und über alle Probanden hinweg gegen die Nullhypothese getestet (*second-level analysis*).

Entsprechend der Hypothese (a), wonach bewertende Rückmeldungen zu einer erhöhten Aktivität im Belohnungssystem führen, wurden die drei modalitätsspezifischen Kontraste zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen sowie der Kontrast aller bewertenden Rückmeldungen im Vergleich zur Baseline konjunktiv miteinander verbunden.

Zur Analyse der Hypothese (b), die einen Anstieg der Aktivität in sensorischen Arealen der jeweiligen Modalität voraussagt, wurde für jede Modalität der Kontrast zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen berechnet und konjunktiv mit dem Kontrast verbunden, in dem die jeweilige Modalität zu stärkeren Aktivierungen führt als die komplementäre Modalität. Folgende drei Vergleiche ergeben sich hierbei:

- visuell bewertend vs. visuell registrierend & visuell vs. auditiv,
- verbal bewertend vs. verbal registrierend & verbal vs. visuell,
- auditiv bewertend vs. auditiv registrierend & auditiv vs. visuell

Zur Korrektur multipler Vergleiche wurden die Daten mit Hilfe der *False discovery rate* (FDR) korrigiert ($q < 0,05$).

3.4 Ergebnisse

Auf Grundlage der berechneten Kontraste wurden *Volumes of interest* (VOI) definiert, die auf dem gewählten Signifikanzniveau eine Voxelanzahl größer als 50 mm^3 umfassen. Für jedes VOI wurde ein *Region of interest* (ROI)-GLM (RFX) zur Bestimmung der mittleren *t*-Werte berechnet.

Verhaltensdaten

Die Mittelwerte der Reaktionszeiten und die Fehlerrate der Probanden wurden aus den von Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, USA) aufgezeichneten log-Dateien berechnet. Die Verhaltensdaten wurden zur statistischen Analyse in das Programm SPSS (PASW Statistics) eingelesen. In einer 2x3 faktoriellen Varianzanalyse für Messwiederholungen wurden die Faktoren *Informationsgehalt* (registrierende Rückmeldung, bewertende Rückmeldung) und *Modalität* (visuell, verbal, auditorisch) auf signifikante Unterschiede in der Reaktionszeit überprüft. In die Analyse der Fehlerrate ging nur der Faktor *Informationsgehalt* (registrierende Rückmeldung, bewertende Rückmeldung) ein. Eine zusätzliche Unterteilung der Fehler auf die drei Modalitäten ist aufgrund der geringen Fehleranzahl der Probanden statistisch nicht sinnvoll.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Verhaltensdaten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten während registrierender und bewertender Rückmeldungen sind in Tabelle 3.2 entsprechend der Modalität der Rückmeldung aufgelistet. Die Berechnung der Varianzanalyse für die Reaktionszeiten ergab weder für den Faktor *Informationsgehalt* (registrierende Rückmeldung, bewertende Rückmeldung) noch für den Faktor *Modalität* (visuell, verbal, auditorisch) einen signifikanten Unterschied.

Auch die Fehlerrate zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen registrierenden ($9,4\% \pm 6,9$) und bewertenden ($8,8\% \pm 5,5$) Rückmeldungen.

In der Nachbefragung (siehe Anhang A.1, Seite 106) gab die Mehrzahl der Probanden an, bewertende Rückmeldungen zu bevorzugen ($n = 13$). Sieben Probanden gaben an, die visuellen

Tabelle 3.2: Reaktionszeiten in ms während registrierender und bewertender Rückmeldungen aufgeteilt nach der Modalität der Rückmeldung. Die Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.

Reaktionszeit [ms]	registrierende RM	bewertende RM
visuell	678,9 (81,0)	641,4 (90,3)
verbal	683,7 (75,7)	664,3 (89,2)
auditorisch	679,7 (85,1)	661,8 (98,0)
gesamt	680,8 (79,0)	655,9 (91,2)

Rückmeldungen den beiden auditiven Arten der Rückmeldung vorzuziehen. Fünf der Befragten empfanden sowohl die visuellen als auch die verbalen Rückmeldungen als angenehm, aber nur ein Proband gab an, ausschließlich die verbalen Rückmeldungen zu bevorzugen. Zwei Probanden bewerteten die auditorischen Rückmeldungen in Form von Sinustönen als angenehm. Zehn Probanden empfanden diese Art der Rückmeldung dagegen als störend. Insgesamt zeichnet sich ab, dass visuelle bewertende Rückmeldungen von den Probanden während einer auditorischen Kategorisierungsaufgabe bevorzugt werden.

3.4.2 fMRT-Daten

Die Berechnung des ersten Kontrastes zwischen bewertenden Rückmeldungen und registrierenden Rückmeldungen ergab eine Vielzahl von Hirnregionen mit stärkerer Aktivität während bewertender Rückmeldungen (siehe Tabelle 3.3). Die Aktivitätsunterschiede finden sich bilateral in frontalen Regionen, in sekundär auditorischen und visuellen Arealen, im Nucleus ruber des Hirnstamms, in der linken Insula und dem posterioren Gyrus cinguli. Nach Stimulusbeginn steigt die BOLD-Antwort in diesen Regionen steil an und erreicht einen ersten Peak nach 7 Sekunden. Die bewertenden Rückmeldungen aller drei Modalitäten weisen bereits zu diesem Zeitpunkt eine minimal höhere Signaländerung auf verglichen mit den registrierenden Rückmeldungen. Anschließend sinkt die BOLD-Antwort leicht und stagniert auf einem Plateau bis zum Ende der Stimuluspräsentation. Dieses Plateau liegt für bewertende Rückmeldungen deutlich über dem Plateau der registrierenden Rückmeldungen (siehe Abbildungen 3.2(b) und 3.3(b)). Besonders deutlich ist der Unterschied im posterioren Gyrus cinguli zu beobachten. Hier fällt die BOLD-Kurve der registrierenden Rückmeldungen bis auf Baseline-Niveau ab (siehe Abbildung 3.1(b)). Nach Ende der Stimuluspräsentation kommt es in dieser Region zu einem erneuten Peak in der BOLD-Kurve, bevor das Signal wie in den anderen Regionen auf Baseline-Niveau absinkt.

Der Vergleich zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen ergab keinen signifikanten Aktivitätsunterschied im Striatum. Aus diesem Grund wurde die Gesamtaktivität im Striatum, die durch alle Experimentalbedingungen hervorgerufen wurde, analysiert. Es zeigt sich, dass sowohl registrierende als auch bewertende Rückmeldungen zu einer verstärkten Aktivität in dieser Region führen (siehe Abbildung 3.5).

3.4 Ergebnisse

Tabelle 3.3: Regionen mit stärkerer Aktivität während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen unabhängig von der Modalität der Rückmeldung.

Region	Talairach			Hemisphäre	BA	Voxelanzahl	t-Wert
	x	y	z				
Gyrus cinguli posterior	0	-28	26	links/rechts	23	1145	2,89
Gyrus precentralis	12	-29	62	rechts	4	102	-2,53
Gyrus precentralis	50	0	37	rechts	6	72	2,45
Lobus parietalis inferior	-53	-31	32	links	40	317	2,45
Gyrus frontalis medius	-32	23	28	links	9	450	2,49
Gyrus frontalis superior	26	45	28	rechts	9	178	2,59
Insula	-35	10	6	links	13	227	2,49
Insula	-35	-5	1	links	13	146	2,42
Sulcus temporalis superior	51	-35	3	rechts	22	121	2,43
Gyrus temporalis medius	47	-49	4	rechts	22	321	2,46
Nucleus ruber	-6	-22	-8	links		425	2,66
Nucleus ruber	9	-23	-7	rechts		312	2,62
Gyrus fusiformis	-36	-65	-10	links	19	713	2,55
Gyrus fusiformis	34	-61	-12	rechts	37	1601	2,85
Gyrus occipitalis medius	-25	-38	-10	links	18	1146	2,60
Nucleus dentatus	13	-54	-23	rechts		230	2,81

Der Vergleich zwischen den Modalitäten ergab auf dem gewählten Signifikanzniveau von $FDR < 0,05$ nur in den (sekundär) sensorischen Arealen der visuellen Modalität einen signifikanten Unterschied zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen (siehe Tabelle 3.4). Im BOLD-Verlauf (siehe Abbildung 3.6(b)) wird deutlich, dass nur bewertende Rückmeldungen zu einem dauerhaften Anstieg des Signals beitragen, während das Signal für registrierende Rückmeldungen - trotz bestehender Stimuluspräsentation - bereits nach kurzer Zeit (12 s) auf Baseline-Niveau sinkt.

Tabelle 3.4: Regionen mit stärkerer Aktivität während visueller bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu visuellen registrierenden Rückmeldungen.

Region	Talairach			Hemisphäre	BA	Voxelanzahl	t-Wert
	x	y	z				
Gyrus temporalis inferior	40	-61	-9	rechts	37	5623	4,69
Gyrus temporalis inferior	-40	-62	-4	links	37	7686	4,59

3.5 Diskussion

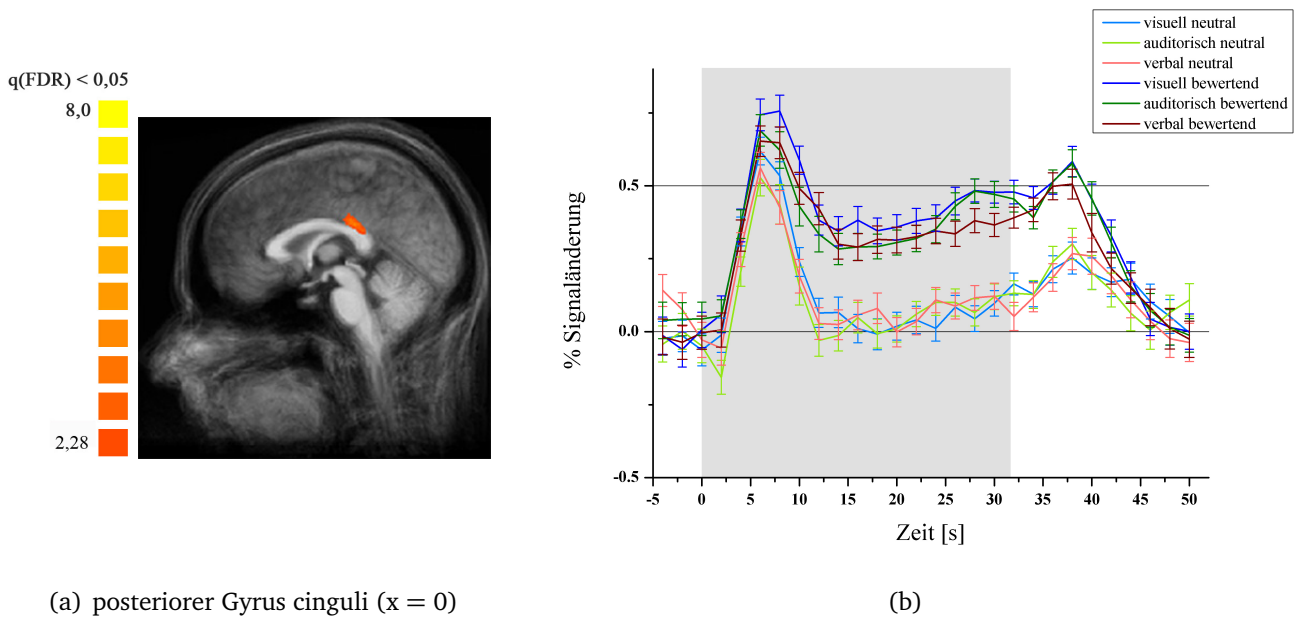


Abbildung 3.1: Stärkere Aktivierung des posterioren Gyrus cinguli (a) während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen. Der Verlauf des BOLD-Signals (b) zeigt diesen Effekt über alle Modalitäten hinweg in dieser Region. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

3.5 Diskussion

3.5.1 Allgemeine Diskussion

Weder die Reaktionszeiten noch die Fehlerraten weisen einen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Bedingungen auf. Es liegen keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Modalitäten der Rückmeldung vor. Auch bewertende und registrierende Rückmeldungen führen nicht zu signifikant unterschiedlichen Reaktionszeiten und Fehlerraten der Probanden. Die drei Hypothesen zu den beiden Verhaltensparametern können anhand der Daten nicht bestätigt werden. Tendenziell zeigt sich jedoch, dass Probanden eine bessere Leistung während bewertender Rückmeldungen aufweisen. Auch die Ergebnisse der Nachbefragung lassen vermuten, dass bewertende Rückmeldungen für die hier verwendete auditorische Kategorisierungsaufgabe zu bevorzugen sind.

Die Daten der fMRT-Analyse zeigen, dass in einer Vielzahl von Arealen bewertende Rückmeldungen die neuronale Aktivität im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen verstärken (siehe Tabelle 3.3). Allerdings kann Hypothese (a) nicht bestätigt werden, da im Belohnungssystem keine Aktivitätsunterschiede vorliegen. Die Analyse zeigt, dass bewertende und registrierende Rückmeldungen das Striatum gleichermaßen aktivieren (siehe Abbildung 3.5). Die Beobachtung, dass bereits registrierende Rückmeldungen zu Aktivierungen im Striatum führen, entspricht den Befunden von Behne et al. (2008) und Kohrs et al. (2012), die in dieser Region eine erhöhte Aktivität nach registrierenden Rückmeldungen fanden. Studien zum Belohnungslernen

3.5 Diskussion

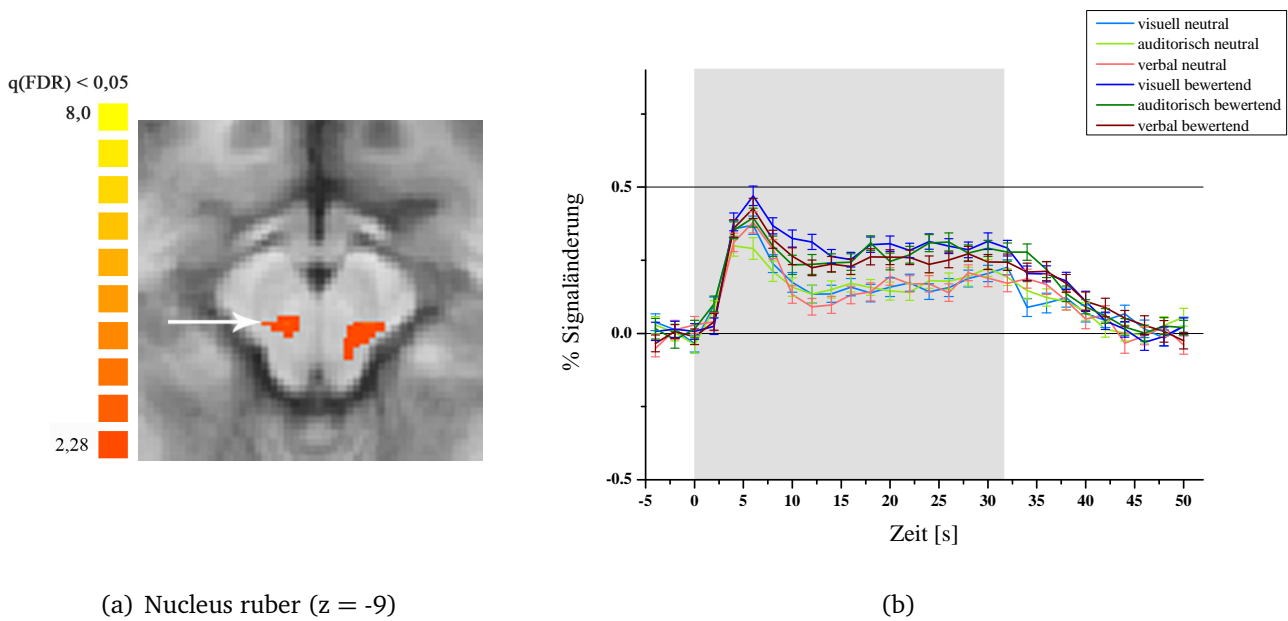


Abbildung 3.2: Stärkere Aktivierung im Nucleus ruber (a) während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen. Der Verlauf des BOLD-Signals (b) zeigt diesen Effekt über alle Modalitäten hinweg in dieser Region. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

konnten zeigen, dass positive Rückmeldungen zu einer stärkeren Aktivität führen als negative oder neutrale Rückmeldungen (Delgado, 2007; Nieuwenhuis et al., 2005a,b; O’Doherty, 2004). Vermutlich wird dieser Effekt zwischen positiven und negativen Rückmeldungen im Blockdesign der vorliegenden Studie durch die Mitteilung negativer und positiver Rückmeldungen verdeckt. Eine Differenzierung der Probandenantworten ist aufgrund des Stimulusdesigns nicht möglich.

Die Hypothese (b), die besagt, dass sensorische Areale modalitätsspezifisch durch bewertende Rückmeldungen verstärkt aktiviert werden, ist nur bedingt aufrechtzuerhalten. In auditorischen Arealen der rechten Hemisphäre (BA 22) zeigen sich nur in der Analyse gemittelt über alle Modalitäten signifikante Unterschiede zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen. In der Einzelanalyse der auditorischen Modalität (sowohl für verbale als auch auditorische Rückmeldungen) zeigen sich auf dem gewählten Signifikanzniveau keine Unterschiede. Eine mögliche Ursache ist in der auditorischen Kategorisierungsaufgabe zu suchen, die unabhängig von der Art der Rückmeldung ebenfalls die neuronale Aktivität in auditorischen Arealen erhöht. Aufgrund des Designs ist anzunehmen, dass die neuronale Antwort auf die Rückmeldung von der neuronalen Antwort auf die auditorische Kategorisierungsaufgabe in den auditorischen Arealen überlagert wird. Nur in visuellen Arealen (BA 19) zeigen sich deutliche modalitätsspezifische Unterschiede zwischen den bewertenden und registrierenden Rückmeldungen (siehe Abbildung 3.6). Im Folgenden werden sowohl die Aufgaben und Funktionen dieser visuellen Areale als auch der wichtigsten Regionen des modalitätsübergreifenden Kontrasts zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen (siehe Tabelle 3.3) diskutiert.

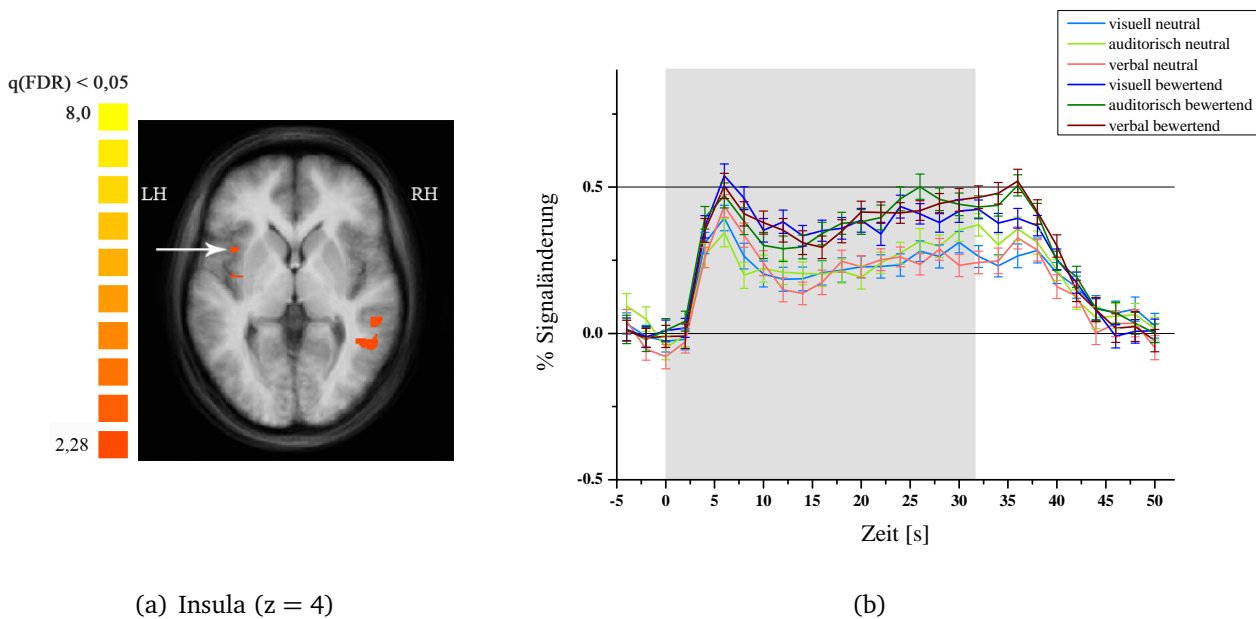


Abbildung 3.3: Stärkere Aktivierung in der Insula (a) während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen. Der Verlauf des BOLD-Signals (b) zeigt diesen Effekt über alle Modalitäten hinweg in dieser Region. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

3.5.2 Hirnareale

Gyrus cinguli posterior

Besonders deutlich zeigen sich die Aktivitätsunterschiede zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen im Gyrus cinguli posterior (PCC) (siehe Abbildung 3.1). Die Anzahl der im Kontrast zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen aktivierten Voxel ist in dieser Region im Vergleich zu allen anderen aktivierten Regionen besonders hoch. Zudem ist dieser Unterschied in der Aktivierungsstärke unabhängig von der Modalität der Rückmeldung.

Der PCC ist eine der metabolisch aktivsten Regionen des Gehirns und ist mit einer Vielzahl von Hirnarealen verbunden, die ihrerseits Aufmerksamkeitsprozesse steuern (Area7, Lobus parietalis inferior), für Lernen und Motivation von Bedeutung sind (Nucleus caudatus, Gyrus cinguli anterior, Orbitofrontal-Kortex) oder an Gedächtnisprozessen beteiligt sind (Gyrus parahippocampalis) (Cauda et al., 2010; Olson & Musil, 1992; Pearson et al., 2011; Vogt et al., 1992). Vogt et al. (1992) bezeichnen den PCC als Bewertungssystem, welches sensorische Ereignisse der Umwelt und das Verhalten des Organismus überwacht. Studien haben gezeigt, dass Neurone innerhalb des PCC durch visuelle Stimulation aktiviert werden (Olson & Musil, 1992; Sikes et al., 1988). Besonders saliente visuelle Reize führen zu einer verstärkten Aktivität in dieser Region, unabhängig davon, ob sie beachtet werden oder nicht. Andere Studien haben gezeigt, dass der PCC durch emotionale Stimuli aktiviert wird (visuell und auditorisch), besonders dann, wenn diese für den Betrachter von persönlicher Bedeutung sind (Maddock et al., 2001, 2003).

3.5 Diskussion

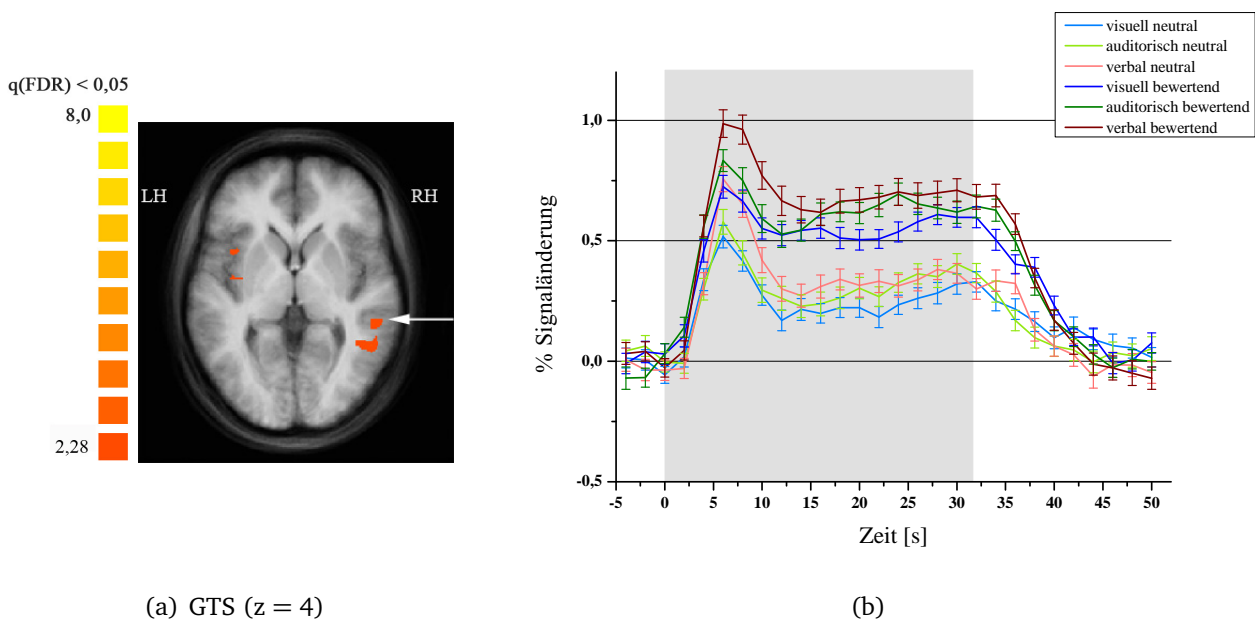


Abbildung 3.4: Stärkere Aktivierung im Gyrus temporalis superior (a) während bewertender Rückmeldungen im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen. Der Verlauf des BOLD-Signals (b) zeigt diesen Effekt über alle Modalitäten hinweg in dieser Region. Die stärkste Aktivierung erreichen bewertende verbale Rückmeldungen. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

Zudem codieren die Neurone des PCC die Größe einer Belohnung bzw. den subjektiven Wert einer ausgeführten Handlung (Kable & Glimcher, 2007; McCoy & Platt, 2005). Pearson et al. (2011) schlussfolgern, dass der PCC Verhaltensänderungen initiiert, wenn unerwartet Veränderungen in der Umwelt auftreten.

Wie fMRT-Studien zur *resting state*¹-Aktivität zeigen, ist der PCC Teil des „default-Netzwerks“ und weist unter der Experimentalbedingung völliger Ruhe Aktivität auf. Diese wird mit der Funktion des PCC assoziiert, die Umwelt auch in völliger Ruhe unablässig zu überwachen (Gusnard & Raichle, 2001). Während aktiver Aufgaben kommt es im PCC dagegen zu einer Abnahme der Aktivität. Dies scheint im Gegensatz zu den oben genannten Befunden zu stehen, wonach der PCC durch verschiedene sensorische Stimuli aktiviert wird. Für saliente visuelle Stimuli hat sich aber gezeigt, dass diese nicht bewusst vom Betrachter wahrgenommen werden müssen, um Neurone des PCC zu aktivieren (Vogt et al., 1992). Folgerichtig argumentieren Pearson et al. (2011), dass es zu einer Abnahme der Aktivität im PCC durch kognitive Beanspruchung kommt, während die Zunahme der Aktivität in dieser Region mit Veränderungen in der Umwelt oder des

¹*Resting state*-Experimente messen die neuronale Aktivität in Ruhe. Das bedeutet, Probanden werden keinem Stimulus oder verhaltensrelevanten Reiz ausgesetzt. Je nach Experiment werden die Augen geschlossen oder offen (mit oder ohne visueller Fixierung) gehalten. Ohne eine Aufgabe gehen die Probanden Stimulus-unabhängig ihren Gedanken nach. Im Vergleich zu üblichen Bildgebungsstudien werden die äußeren Bedingungen nicht weiter kontrolliert. Das Ziel solcher Experimente ist es, die statistischen Eigenschaften endogener (spontaner, intrinsischer) neuronaler Aktivität zu erfassen (Snyder & Raichle, 2012).

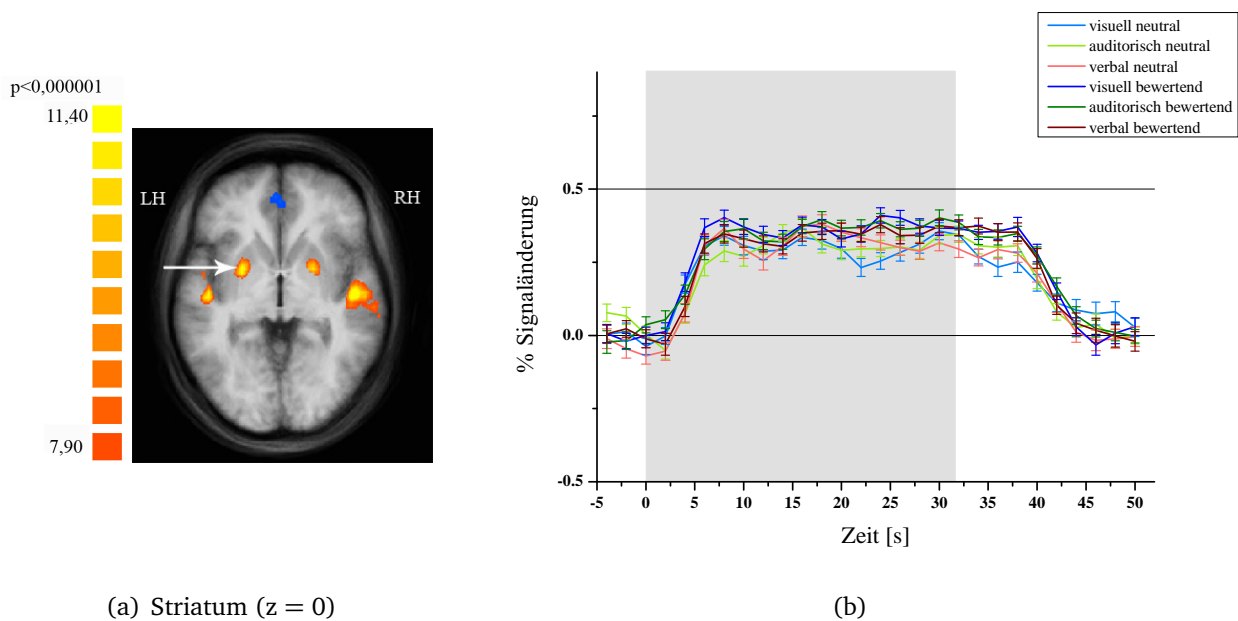


Abbildung 3.5: Stärkere Aktivierung im Striatum (a) in allen Bedingungen. Der Anstieg des BOLD-Signals (b) ist für alle Formen der Rückmeldung gleich und damit unabhängig vom Informationsgehalt der Rückmeldung. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

internen Status einhergeht. Eine erhöhte Aktivität im PCC unterstützt flexibles und exploratives Verhalten und trägt somit zum Prozess des Lernens bei (Pearson et al., 2011).

Der vorliegende Befund einer erhöhten Aktivität des PCC während bewertender Rückmeldungen steht im Einklang mit den Ergebnissen der hier zitierten Studien (Cauda et al., 2010; Kable & Glimcher, 2007; Maddock et al., 2001, 2003; McCoy & Platt, 2005; Pearson et al., 2011; Vogt et al., 1992). Bewertende Rückmeldungen weisen durch ihren erhöhten Informationsgehalt eine größere Salienz und Bedeutung für den Probanden auf als registrierende Rückmeldungen. Erst durch die Rückmeldung über die Korrektheit der Eingabe ist der Proband in der Lage, sein Verhalten korrekt einzuschätzen und aus möglichen Fehlern zu lernen. Möglicherweise reflektiert die erhöhte Aktivität des PCC Anpassungsprozesse des Organismus an die verfügbare Information über die Korrektheit der Eingabe.

Insula

Eine weitere Region, in der bewertende Rückmeldungen zu einer erhöhten Aktivität führten, ist die linke Insula. Auf einem niedrigeren Signifikanzniveau finden sich auch Aktivitätsunterschiede in der rechten Insula. Die Insula des Menschen unterliegt einer cytoarchitektonischen und funktionellen Dreiteilung (Deen et al., 2011). Dem ventralen anterioren agranularen Anteil wird eine Funktion in der Verarbeitung von Emotionen und Interozeption zugeordnet. Weiter dorsal spielt die anteriore Insel eine wichtige Rolle für die kognitive Kontrolle und das Entscheidungsverhalten. Die posterioren granularen Anteile der Insel verarbeiten dage-

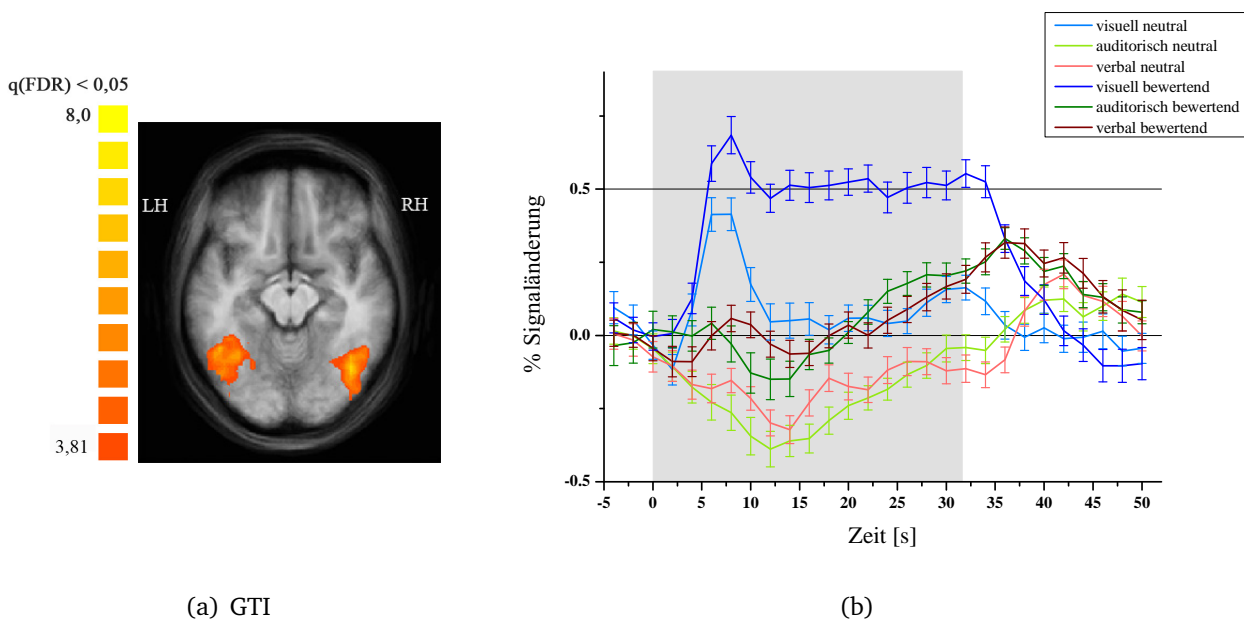


Abbildung 3.6: Stärkere Aktivierung in den visuellen Arealen (a) während der conjunction-Analyse aus visuell bewertenden Rückmeldungen im Vergleich zu visuell registrierenden Rückmeldungen und dem Vergleich visueller Aktivierung mit auditorischer Aktivierung. Der Verlauf des BOLD-Signals (b) zeigt diesen Effekt in dieser Region. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

gen motorische und somatosensorische Informationen. Der zentrale dysgranuläre Anteil gilt als Überlappungsregion beider Gebiete und umfasst in der rechten Hemisphäre olfaktorische und gustatorische Areale (Deen et al., 2011; Klein et al., 2013; Kurth et al., 2010).

Die vorliegenden Aktivitätsunterschiede liegen im dorsalen anterioren bis zentralen Anteil der Insula. Nach Deen et al. (2011) ist diese Region an der kognitiven Kontrolle während eines Entscheidungsprozesses beteiligt. Cauda et al. (2011) beschreiben sie als Aufmerksamkeitsregion. Diese Interpretationen stehen im Einklang mit dem vorliegenden Ergebnis, wonach bewertende Rückmeldungen in dieser Region zu einer erhöhten Aktivität führen, da sie mehr Aufmerksamkeit auf sich lenken. Durch die Information über die Korrektheit seiner Eingabe beeinflussen bewertende Rückmeldungen das Entscheidungsverhalten des Probanden in nachfolgenden Durchgängen und stoßen möglicherweise Lern- und Planungsprozesse an.

Nucleus ruber

Wie die Ergebnisse zeigen, führen bewertende Rückmeldungen auch im Bereich des Mesencephalon im Kerngebiet des Nucleus ruber (RN) zu einer erhöhten Aktivität im Vergleich zu registrierenden Rückmeldungen. Die Funktionen dieses Kernkomplexes aus einem parvocellulären (pcRN) und einem magnocellulären (mcRN) Teil sind für den Menschen bisher wenig erforscht. Während der kleinere mcRN mit prämotorischen und motorischen Arealen verbunden ist und bewegungsabhängig aktiviert wird, weist der beim Menschen größere pcRN

Afferenzen zu einem ausgedehnten Netzwerk von Regionen auf. Mittels der Diffusions-Tensor-Bildgebung (DTI) konnten Verbindungen vom ipsilateralen Präfrontalkortex, Temporal- und Occipitalkortex und dem Nucleus dentatus (DN) des Kleinhirns identifiziert werden (Habas & Cabanis, 2007). Nioche et al. (2009) zeigen in ihrer Studie zur Konnektivität des pcRN, dass Verbindungen zu assoziativen präfrontalen Arealen (Brodmann-Areal (BA) 11, 45, 46 und 47), parietalen, occipitalen und temporalen Gebieten bestehen sowie zu limbischen Strukturen und der Insel. Dagegen finden sie keine direkten Verbindungen zu motorischen Arealen. Aus diesen Befunden schlussfolgern Nioche et al. (2009), dass der RN kognitive Funktionen besitzt und über seine Efferenzen zur inferioren Olive modulierend auf das motorische olivocerebellare System wirkt. Nioche et al. (2009) beschreiben den RN als eine Relaisstation zur Detektion salienter sensorischer Informationen aus der Umwelt. Somit ist der RN zur Kontrolle exekutiver Funktionen befähigt. Die erhöhte Aktivität des RN während bewertender Rückmeldungen spricht dafür, dass dieser Kernkomplex die salienten Informationen aus den bewertenden Rückmeldungen (richtig/falsch) nutzt, um die motorischen Abläufe der Kategorisierungsaufgabe zu verbessern. Die vorliegenden Aktivitätsunterschiede im DN des Cerebellums (siehe Tabelle 3.3) sprechen für die Möglichkeit einer modulatorischen Einflussnahme auf die Motorik durch den RN.

Sulcus temporalis superior

Eine erhöhte Aktivität während bewertender Rückmeldungen findet sich auch im rechten posterioren *Sulcus temporalis superior* (STS), einem multisensorischen Areal, das auditorische und visuelle Stimuli integriert (Calvert, 2001; Driver & Noesselt, 2008). Im vorliegenden Experiment wird die Aktivität durch die Art der Rückmeldung moduliert, wobei vor allem bewertende Rückmeldungen - unabhängig von der Modalität der Rückmeldung - zu einem Anstieg der Aktivität führen. Die Abbildung 3.4 zeigt aber auch, dass besonders verbale Rückmeldungen im Vergleich zu rein auditorischen und visuellen Rückmeldungen zu einem Aktivitätsanstieg in der Region führen. Dies steht im Einklang mit Befunden, die zeigen, dass der STS beider Hemisphären (insbesondere aber das linkshemisphärische Wernicke-Areal) an der Verarbeitung linguistischer audiovisueller Signale beteiligt ist (Calvert, 2001). Die Studie von Driver & Noesselt (2008) zeigt weiterhin, dass der STS *top-down* einen Einfluss auf primäre auditorische und visuelle Areale ausübt. In der vorliegenden Studie kann jedoch kein Aktivitätsunterschied zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen in primär visuellen oder auditorischen Arealen beobachtet werden. Nur sekundäre visuelle Areale weisen einen Unterschied auf (siehe folgender Abschnitt).

Der Befund, dass die Aktivität auf dem untersuchten Signifikanzniveau nur rechts-hemisphärisch auftritt, ist möglicherweise auf die auditorische Aufgabenstellung zurückzuführen. Die Kategorisierung der FM-Richtung führt zu einer rechtshemisphärischen Aktivität im auditorischen Kortex (Brechmann & Scheich, 2005). Andererseits beruht der rechts-

hemisphärische Aktivitätsunterschied auf den bewertenden Rückmeldungen. Diese beinhalten die Informationen über korrekte und inkorrekte Eingaben. Weis et al. (2013) fanden mittels einer auditorischen Kategorisierungsaufgabe eine erhöhte Aktivität im rechten auditorischen Kortex während korrekter im Vergleich zu inkorrekt visueller Rückmeldung. Zudem konnten sie eine erhöhte Aktivität im rechten Gyrus temporalis medius (BA21) während inkorrekt visueller Rückmeldungen im Vergleich zu korrekten visuellen Rückmeldungen nachweisen. Dieses von Weis et al. (2013) beschriebene Areal grenzt an die hier vorliegende Aktivität des posterioren STS. Auch wenn die vorliegende Studie keinen direkten Vergleich zwischen korrekten und inkorrekten Rückmeldungen ermöglicht, so kann doch festgehalten werden, dass die informationsreichen bewertenden Rückmeldungen in dieser Region einen stärkeren Aktivitätsanstieg auslösen als registrierende Rückmeldungen.

Visuelle Areale

Anders als in den auditorischen Arealen zeigen visuelle Areale eine modalitätsspezifische signifikant erhöhte Aktivität während bewertender Rückmeldungen. Der aktivierte Bereich umfasst höhere visuelle Verarbeitungsareale (V3, V4, V5, V6) und gilt als Ausgangspunkt der neuronalen Differenzierung zwischen dem visuellen Was- und dem Wo-Pfad (Grill-Spector & Malach, 2004). Das aktivierte Areal ist essentiell an der Verarbeitung der Form visueller Objekte beteiligt. Bei wiederholter Präsentation des gleichen Objekts nimmt die Aktivität ab, die Neurone adaptieren. Werden dagegen Objekte mit unterschiedlichen Formen präsentiert, findet keine Adaptation statt (Grill-Spector et al., 2001). Im vorliegenden Experiment wurde während registrierender Rückmeldungen der visuelle Stimulus konstant gehalten. Eine Adaptation an die immer wiederkehrende Kreisform gilt daher als mögliche Ursache für die Signalabnahme während registrierender Rückmeldungen im Vergleich zu bewertenden Rückmeldungen. Während bewertender Rückmeldungen wechselte aufgrund von falschen und richtigen Antworten das präsentierte visuelle Feedback und die neuronale Aktivität blieb über den Zeitraum der Präsentation auf dem erhöhten Aktivitätsniveau bestehen. Sehr wahrscheinlich lenken die bewertenden Rückmeldungen mehr Aufmerksamkeit auf sich als einfache registrierende Rückmeldungen. Die erhöhte Aufmerksamkeit kann nach Kanwisher & Wojciulik (2000) dazu führen, dass ausgehend von präfrontalen und parietalen Regionen die Aktivität in den visuellen Arealen *top-down* verstärkt wird.

4 Studie II: Verzögerungen in der Präsentation von Rückmeldungen

4.1 Vorstudie: Schwellenbestimmung einer wahrnehmbaren Verzögerung

4.1.1 Einleitung

Die Studie II hatte zum Ziel, den Einfluss unerwarteter Verzögerungen einer Systemrückmeldung auf die Hirnaktivität eines Nutzers zu untersuchen. Hierfür sollten Verzögerungen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle, auf und unter der Wahrnehmungsschwelle eingesetzt werden. Im ersten Schritt galt es daher, die Wahrnehmungsschwelle einer Verzögerung zu bestimmen. Aus der Computer-Ergonomie ist bekannt (siehe Abschnitt 1.2.4), dass einfache Interaktionsschritte, wie das Betätigen eines Tasters, möglichst ohne Verzögerung, spätestens aber nach 200 ms vom System bestätigt werden sollten (Dabrowski & Munson, 2011; Miller, 1968; Seow, 2008; Shneiderman & Plaisant, 2005). Trotz fehlender empirischer Befunde gelten SRZ von 200 ms als ein Schwellwert für das Gelingen der Interaktion. Verschiedene Faktoren wie die Aufgabenstellung und die Erfahrungen eines Nutzers beeinflussen jedoch diese Schwelle (siehe Abschnitt 1.2.2).

In der Vorstudie sollten die Probanden die FM-Kategorisierungsaufgabe lösen und hatten zusätzlich die Aufgabe, Verzögerungen in der Systemrückmeldung zu detektieren. Dass nicht nur die Aufgabenstellung einen Einfluss auf die Wahrnehmungs-/Toleranzschwelle hat, sondern auch individuelle Faktoren wie das Alter diese Schwelle beeinflussen, berichten Shneiderman & Plaisant (2005). Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Studie zwei Alterskohorten untersucht, um mögliche Unterschiede, hervorgerufen durch das Alter der Nutzer, aufzudecken. Mit dem Alter können sich kognitive Prozesse und das motorische Antwortverhalten verlangsamen (Salthouse, 1996). Beeinträchtigungen in der Sensorik führen dazu, dass ältere Menschen mehr Aufmerksamkeit auf die Interpretation der sensorischen Informationen lenken müssen, wodurch weniger kognitive Ressourcen zur Aufgabenbewältigung zur Verfügung stehen und es zu einer Verlangsamung der Reaktion kommt (Mather, 2010). In vielen verschiedenen Aufgaben, bspw. in Reaktionszeit-, Arbeitsgedächtnis- und visuellen Suchaufgaben nimmt die Leistung mit dem Alter ab. Vor allem in Aufgabenstellungen mit einer Zweitaufgabe und/oder

4.1 Vorstudie: Schwellenbestimmung einer wahrnehmbaren Verzögerung

Aufgabenwechseln sinkt die Leistung Älterer (Verhaeghen & Cerella, 2002). Möglicherweise liegt die Wahrnehmungsschwelle der älteren Probanden für eine verzögerte Systemantwort über der Schwelle der jungen Probanden, da das Klassifizieren der FM-Töne die älteren Probanden stärker beansprucht als die jungen Probanden.

4.1.2 Hypothesen

Folgende Hypothesen lassen sich für die Bestimmung der Schwelle ableiten

- (a) Die Schwelle für das Wahrnehmen einer Verzögerung der Systemrückmeldung sollte im Mittel 200 ms betragen.
- (b) Junge Probanden weisen eine niedrigere Schwelle auf als ältere Probanden.
- (c) Die Wahrnehmungsschwelle ist abhängig von der individuellen kognitiven Belastung des Probanden.

4.1.3 Probanden

An der Vorstudie nahmen 14 jüngere Probanden mit einem Durchschnittsalter von $28,4 \pm 4,1$ Jahren und 10 ältere Probanden mit einem Durchschnittsalter von $66,5 \pm 6,3$ Jahren teil.

4.1.4 Stimulusdesign

In einem adaptiven Experimentaldesign wurde am PC die Schwelle der Verzögerungsdauer bestimmt, die ein Proband gerade noch wahrnehmen kann, während er eine auditorische Kategorisierungsaufgabe löst. Die per Mausklick zu kategorisierenden Töne hatten eine Länge von 600 ms und wurden mit der Konstante $k = 2$ moduliert. Die Rückmeldung erfolgte verbal („okay“) und informierte den Probanden nur darüber, dass seine Eingabe vom System registriert wurde. Neben der Kategorisierungsaufgabe waren die Probanden dazu aufgefordert, Verzögerungen in der Rückmeldung zu detektieren. Innerhalb eines Blocks aus zehn zu kategorisierenden FM-Tönen und der dazugehörigen Rückmeldung wurde eine (bzw. als Kontrolle keine) der Rückmeldungen mit einer Verzögerung präsentiert. Nach jedem Block gaben die Probanden per Tastendruck an, ob sie eine Verzögerung innerhalb des vorangegangenen Blocks bemerkt haben oder nicht. Entsprechend ihrer Antworten wurde die Dauer der Verzögerung im folgenden Block in Schritten von 50 ms verkürzt oder verlängert. Das Experiment begann mit einer Verzögerungsdauer von 500 ms. Erreichten die Probanden eine erste kritische Schwelle von 300 ms bzw. absolvierten sie 20 Blöcke ohne die Schwelle von 300 ms zu erreichen, begann die zweite Phase des Experiments. Ausgehend von einer Verzögerungsdauer von 300 ms mussten sie weitere 30 Durchgänge absolvieren. In diesen Durchgängen pendelten sich

4.1 Vorstudie: Schwellenbestimmung einer wahrnehmbaren Verzögerung

die Werte der noch wahrnehmbaren Verzögerung in Schritten von 25 ms um die individuelle Schwelle ein. Insgesamt dauerte die Bestimmung der individuellen Schwelle der Verzögerung 20 bis 30 Minuten.

4.1.5 Datenerhebung

Die Erhebung der Wahrnehmungsschwelle einer verzögerten Systemrückmeldung erfolgte in ruhiger Umgebung an einem PC. Die FM-Töne wurden über Kopfhörer (Sennheiser HD408) präsentiert. Während des Experiments wurde auf dem Bildschirm ein weißes Fixationskreuz auf grauem Hintergrund präsentiert. Die Antworteingabe der Kategorisierungsaufgabe erfolgte über eine handelsübliche Maus (linke Taste aufsteigende, rechte Taste abfallende FM-Töne) und die Eingabe der Wahrnehmung einer Verzögerung über die Tastatur ('n' - es wurde keine Verzögerung bemerkt, 'v' es wurde eine Verzögerung bemerkt). Das Experiment wurde mit dem Programm Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, USA) durchgeführt, welches die behavioralen Daten in einer Logdatei speicherte.

4.1.6 Datenanalyse

Zur Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwelle wurde das Mittel der letzten fünf Werte jedes Probanden berechnet. Anschließend wurden die Mittelwerte der älteren und jüngeren Probanden bestimmt und mittels *t*-Test für unabhängige Stichproben miteinander verglichen. In einer Korrelationsanalyse wurde für beide Alterskohorten der Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsschwelle und der Fehleranzahl berechnet. Anschließend wurde in einer partiellen Korrelationsanalyse der Zusammenhang zwischen der erreichten Wahrnehmungsschwelle und der Fehleranzahl unter Berücksichtigung der Alterskohorte analysiert. Die Daten wurden auf Varianzhomogenität mittels Levene-Test überprüft.

4.1.7 Ergebnisse

Die Mittelwerte der erhobenen Wahrnehmungsschwelle einer verzögerten Systemantwort sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Der Vergleich der Mittelwerte beider Alterskohorten zeigt, dass junge Probanden eine signifikant niedrigere Wahrnehmungsschwelle aufweisen als ältere Probanden ($t(23) = -2,70; p < 0,02$). In beiden Altersgruppen streuen die erreichten Schwellenwerte interindividuell sehr stark. Tendenziell ist die Varianz der älteren Probanden größer als die der jungen Probanden. Der Vergleich beider Werte ist jedoch mit $F = 0,99$ und $p = 0,33$ nicht signifikant.

Die Korrelationsanalyse ergab über alle Probanden hinweg einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsschwelle und der Fehleranzahl ($r = 0,64; p < 0,01$).

4.1 Vorstudie: Schwellenbestimmung einer wahrnehmbaren Verzögerung

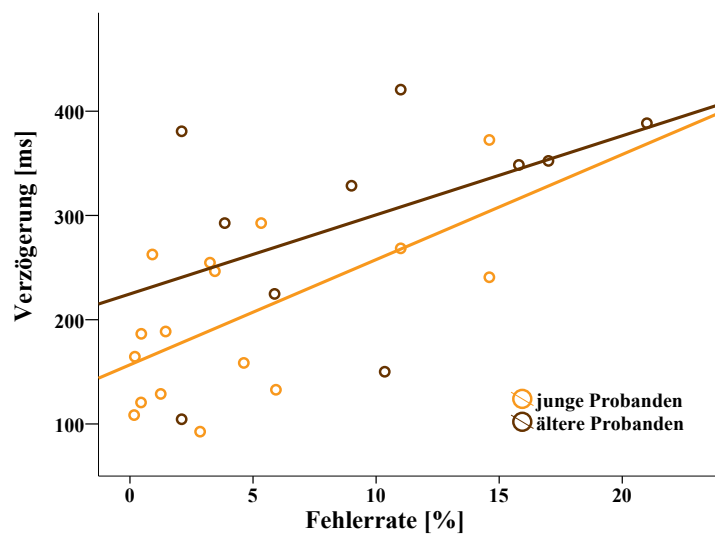


Abbildung 4.1: Zusammenhang der Schwelle und der Fehlerrate in Abhängigkeit vom Alter der Probanden

Je mehr Fehler ein Proband machte, desto höher lag auch seine Wahrnehmungsschwelle der verzögerten Systemantwort. Wird die Korrelationsanalyse für die beiden Alterskohorten getrennt berechnet, so ist der Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsschwelle und Fehleranzahl nur für die jungen Probanden signifikant ($r = 0,66$; $p < 0,01$). Wird der Faktor *Alter* (a) aus der Korrelation von Wahrnehmungsschwelle (v) und Fehleranzahl (f) herauspartialisiert, ergibt sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Schwelle und der Fehleranzahl ($r_{vf.a} = 0,53$; $p < 0,01$). Wird umgekehrt die Korrelation um den Faktor *Fehleranzahl* bereinigt, ergibt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsschwelle und dem Alter ($r_{va.f} = 0,25$; $p < 0,2$). Abbildung 4.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den drei Parametern.

Tabelle 4.1: Mittelwerte der Schwelle und der Fehlerrate für ältere und junge Probanden sowie der Gesamtmittelwert.

Probanden	junge	ältere	gesamt
Schwelle [ms]	201,2 (78,6)	299,1 (106,1)	238,9 (100,6)
Fehlerrate [%]	4,4 (4,9)	9,8 (6,5)	6,5 (6,1)

4.1.8 Diskussion

Unter der Vorgabe einer FM-Kategorisierungsaufgabe detektieren junge Probanden im Mittel Verzögerungen der Systemantwort von 200 ms. Dieser Wert bestätigt die Hypothese (a) und stimmt mit den Annahmen und Befunden der Computer-Ergonomie überein (Dabrowski & Munson, 2011; Miller, 1968; Seow, 2008; Shneiderman & Plaisant, 2005). Auch Hypothese (b) kann bestätigt werden. Ältere Probanden nehmen unter der gegebenen Aufgabenstellung Verzögerungen erst ab einer Schwelle von 300 ms wahr und liegen damit signifikant über der Wahrnehmungsschwelle der jungen Probanden. Über alle Probanden hinweg zeigt sich, dass die Schwelle zur Wahrnehmung einer Verzögerung interindividuell stark streut. Besonders ältere Probanden unterscheiden sich untereinander. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Wahrnehmung einer Verzögerung von weiteren individuellen Faktoren abhängt. Wie die Analyse zeigt, korreliert die Wahrnehmungsschwelle einer Verzögerung mit der Fehlerrate der Probanden. Dieses Ergebnis belegt die Hypothese (c), nach der die individuelle kognitive Beanspruchung einen Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle einer SRZ hat. Die beiden Einflussfaktoren *Alter* und *Fehlerrate*, werden daher im folgenden fMRT-Experiment zu beachten sein.

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

4.2.1 Einleitung

Die Ergebnisse der Vorstudie legen nahe, dass die Aufgabenschwierigkeit und damit einhergehend die kognitive Belastung der Probanden einen Einfluss auf die Wahrnehmung einer verzögerten Systemantwort hat. Abhängig von der individuellen kognitiven Belastung werden Verzögerungen an der Wahrnehmungsschwelle vom Nutzer detektiert oder aber nicht bemerkt. Die vorliegende fMRT-Studie hatte zum Ziel, den Einfluss unterschiedlich langer SRZ - an, unter und oberhalb der individuellen Wahrnehmungsschwelle - auf die Hirnaktivität zu untersuchen. Drei Verzögerungszeiten dienten als experimentelle Bedingungen (200 ms, 400 ms und 600 ms). Im Vergleich zum Vorexperiment wurde durch Anpassung der Modulationsbreite die Schwierigkeit der FM-Stimuli erhöht. Zudem wurden die Verzögerungen den naiven Probanden unerwartet präsentiert. Erst nach dem fMRT-Experiment wurden sie über die verzögerten Systemantworten aufgeklärt. Daher kann angenommen werden, dass Verzögerungen von 200 ms unterhalb der Wahrnehmungsschwelle der Probanden liegen. Verzögerungen von 400 ms sollten unter den gegebenen Bedingungen auf der Schwelle und Verzögerungen von 600 ms deutlich über der Wahrnehmungsschwelle der Probanden liegen. Zur Kontrolle dieser Annahmen wurde in einer Nacherhebung von den Teilnehmern des fMRT-Experiments die individuelle Wahrnehmungsschwelle bestimmt.

Wie aus der Literatur bekannt ist, aktivieren unerwartete Abweichungen in der zeitlichen

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Vorhersage eines Ereignisses Hirnregionen der kognitiven Kontrolle und Handlungsplanung (siehe Abschnitt 1.4.2). Auch verzögerte Systemantworten entsprechen nicht den zeitlichen Erwartungen der Nutzer und lösen sehr wahrscheinlich Vorhersagefehler (*prediction error*) innerhalb der Interaktion aus. Diese *prediction error* aktivieren die anteriore Insel und den medialen Frontalkortex (Limongi et al., 2013). Vor allem der mediale Frontalkortex scheint Abweichungen in der zeitlichen Vorhersage eines Ereignisses zu kodieren (Forster & Brown, 2011; Kohrs et al., 2012). Es wird erwartet, dass Verzögerungen der Systemantwort auf und oberhalb der Wahrnehmungsschwelle der Probanden zu einer erhöhten Aktivität in dieser Region führen.

In der Vorstudie lag die Wahrnehmungsschwelle der Verzögerung bei älteren Probanden signifikant über der Schwelle der jungen Probanden. Möglicherweise lässt sich dieser Unterschied auf veränderte neuronale Korrelate während der Aufgabenbewältigung zwischen jungen und älteren Probanden zurückführen. Viele kognitive Defizite Älterer werden mit der Abnahme der neuronalen Aktivität in frontalen Hirnregionen in Verbindung gebracht (Logan et al., 2002). Diese Areale dienen der kognitiven Kontrolle und Handlungsplanung und könnten auch im vorliegenden Experiment neuronale Aktivitätsunterschiede zwischen jungen und älteren Probanden aufweisen. Unter der Annahme, dass ältere Probanden durch die FM-Kategorisierungsaufgabe stärker kognitiv beansprucht werden, wird vermutet, dass sie unter den gegebenen Bedingungen des fMRT-Experiments die Verzögerungen der Systemantwort kaum wahrnehmen. Folglich wäre der Einfluss der verzögerten Systemantwort auf die neuronale Aktivität bei älteren Probanden geringer ist als bei jungen Probanden.

4.2.2 Hypothesen

Aus der vorliegenden Literatur und der Vorstudie lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

- (a) Unerwartete Verzögerungen der Systemrückmeldung führen zu einer erhöhten Aktivität in Hirnregionen der kognitiven Kontrolle, vor allem in der aI und dem pMFC.
- (b) Je länger die Verzögerung andauert, desto stärker ist der Einfluss auf die neuronale Aktivität.
- (c) Auf die Hirnaktivität älterer Probanden haben Verzögerungen einen geringeren Einfluss im Vergleich zu jungen Probanden.

4.2.3 Probanden

Am Experiment nahmen zwei Alterskohorten teil. Die insgesamt 44 Probanden setzten sich aus 23 jüngeren Probanden (10 weiblich, 13 männlich) mit einem Altersdurchschnitt von $24,8 \pm 2,6$ Jahren und 21 älteren Probanden (10 weiblich, 11 männlich) mit einem Altersdurchschnitt von $67,6 \pm 6,4$ Jahren zusammen. Von den ursprünglich 26 älteren und 31 jüngeren

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Probanden wurden fünf ältere und acht jüngere Probanden aufgrund von Bewegungsartefakten von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Über das Ziel des Experiments wurden die naiven Probanden erst nach Ende des Experiments und nach Ausfüllen des Fragebogens aufgeklärt. Nach der fMRT-Messung nahmen alle jungen Probanden und 13 ältere Probanden an einer Messung zur Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwelle einer Verzögerung teil.

4.2.4 Stimulusdesign

Die auditorischen Stimuli wurden im ereigniskorrelierten Design pseudorandomisiert im Abstand von 6 s, 8 s, und 10 s präsentiert. Zusätzlich wurden 23 Ruhetrials von je 20 s Länge pseudorandomisiert über das gesamte Experiment eingefügt. Die verwendeten FM-Töne mit einer Dauer von 400 ms wurden mit der Konstante k in drei Schwierigkeitsgraden moduliert ($k = 2$ (leicht), $k = 4$ (mittel), $k = 6$ (schwer), siehe Tabellen 4.2 und 4.3). Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass die Probanden ein ausgewogenes Verhältnis von Erfolg und Misserfolg während des Experiments erreichen. Die Mittenfrequenz der FM-Töne lag im Bereich von 700 Hz bis 3800 Hz. In 85 % der Durchgänge wurde den Probanden direkt nach ihrem Tastendruck eine visuelle Rückmeldung über die Korrektheit ihrer Eingabe präsentiert. Hatten die Probanden korrekt geantwortet, sahen sie ein grünes Häkchen, warteten sie zu lange mit ihrer Eingabe (länger als 1,5 s nach Stimulusbeginn) oder antworteten sie falsch, wurde ihnen ein rotes Kreuz präsentiert. Die visuellen Rückmeldungen wurden mit einer Dauer von 500 ms dargeboten. In 15 % ($n = 90$) der Durchgänge erfolgte die Rückmeldung verzögert, d.h. die Verzögerung von 200 ms, 400 ms oder 600 ms wurden je mit fünfprozentiger Wahrscheinlichkeit ($n = 30$) präsentiert.

Nach der fMRT-Messung wurde für jeden Probanden ein Fragebogen erhoben, der klären sollte, ob die Verzögerungen im Experiment wahrgenommen wurden und welche Rolle die subjektive Schwierigkeit der FM-Kategorisierungsaufgabe hierbei spielte (Fragebogen siehe Anhang A). Zur Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwelle einer Verzögerung nahmen die Probanden nach der fMRT-Messung an einem adaptiven Experiment am Computer

Tabelle 4.2: Frequenzbereich der FM-Töne mit leichtem Schwierigkeitsgrad.

400 ms FM Töne		
Anfangsfrequenz	Mittenfrequenz	Endfrequenz
800 Hz	1000 Hz	1200 Hz
880 Hz	1100 Hz	1320 Hz
960 Hz	1200 Hz	1440 Hz
...
2720 Hz	3400 Hz	4080 Hz

Tabelle 4.3: Frequenzbereich der FM-Töne mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad.

400 ms FM Töne		
Anfangsfrequenz	Mittenfrequenz	Endfrequenz
950 Hz	1000 Hz	1050 Hz
1045 Hz	1100 Hz	1155 Hz
1140 Hz	1200 Hz	1260 Hz
...
3230 Hz	3400 Hz	3570 Hz

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

teil (siehe Stimulusdesign der Vorstudie, Seite 52). Während sie die gleichen Stimuli wie im fMRT-Experiment kategorisieren mussten, waren sie aufgefordert auch auf Verzögerungen in der Rückmeldung zu achten. Innerhalb eines Blocks aus acht zu kategorisierenden FM-Tönen und der dazugehörigen Rückmeldung wurde eine (bzw. als Kontrolle keine) der Rückmeldungen mit einer Verzögerung präsentiert, die es zu detektieren galt. Nach jedem Block gaben die Probanden per Tastendruck an, ob sie die Verzögerung bemerkt haben oder nicht. Entsprechend ihrer Antworten wurde die Dauer der Verzögerung in Schritten von 50 ms verkürzt oder verlängert. Für die Kohorte der jungen Probanden begann das Experiment mit einer Verzögerungsdauer von 800 ms. Die älteren Probanden begannen mit einer Verzögerung von 1000 ms. Erreichten die Probanden eine erste kritische Schwelle von 300 ms bzw. absolvierten sie 30 Blöcke ohne die Schwelle von 300 ms zu erreichen, begann analog zur Vorstudie die zweite Phase des Experiments. Ausgehend von einer Verzögerungsdauer von 300 ms mussten sie weitere 30 Durchgänge absolvieren. In dieser Zeit pendelten sich die Werte der noch wahrnehmbaren Verzögerung in Schritten von 25 ms um die individuelle Schwelle ein. Insgesamt dauerte die Bestimmung der individuellen Schwelle der Verzögerung 20 bis 30 Minuten.

4.2.5 Datenerhebung

Die Erhebung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Die Dauer der funktionellen Messung betrug 42 min 16 s. Pro Experiment wurden 1290 Volumen (Bilder) aufgenommen. Anders als in Studie I und den nachfolgenden fMRT-Experimenten der Studie III wurde zur Registrierung der Antwort der Probanden ein Tastersystem (COVILEX ® GmbH, Magdeburg, Deutschland) verwendet, welches die Messung der Tastendruckdynamik ermöglichen sollte (siehe Abschnitt 2.5). Weiterhin wurde an der Kopfspule eine Kamera zur Aufzeichnung der Augenbewegung und Kontrolle des Pupillendurchmessers des rechten Auges angebracht (siehe Abschnitt 2.6).

Die Datenerhebung der individuellen Schwelle fand zu einem zeitnahen Termin nach der fMRT-Messung statt und erfolgte wie in Abschnitt 4.1.5 beschrieben.

4.2.6 Datenvorverarbeitung

Die Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

4.2.7 Datenanalyse

fMRT

Für die Analyse der fMRT-Daten wurde aus der zeitlichen Abfolge des Experimentaldesigns und aus den aufgezeichneten Verhaltensdaten für jeden Probanden ein Experimentalprotokoll

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

erstellt. Dieses ermöglicht die Einteilung der Experimentalbedingungen (Verzögerung 200 ms; Verzögerung 400 ms; Verzögerung 600 ms; sofortige Rückmeldung) entsprechend der Korrektheit der Antworten. Aufgrund des gewählten Studiendesigns wurde für jeden Probanden eine Deconvolution-Analyse berechnet. Das Vorgehen ist in Abschnitt 2.4 beschrieben.

Die resultierenden Datensätze der einzelnen Probanden, mit den individuellen statistischen Karten über die geschätzten Effekte (β -Werte), wurden für die weitere statistische Analyse zusammengeführt und in einer *random effects* Analyse (RFX-GLM) ausgewertet. Vier Kontraste wurden mittels RFX-Analyse berechnet. Ausgehend von der ersten Hypothese wurden folgende drei Kontraste berechnet:

- 200 ms Verzögerung vs. sofortige Rückmeldungen
- 400 ms Verzögerung vs. sofortige Rückmeldungen
- 600 ms Verzögerung vs. sofortige Rückmeldungen

In dieser Analyse wurden nur die korrekten Antworten der Probanden berücksichtigt. Im Anschluss wurden korrekte und inkorrekte Antworten der Probanden miteinander verglichen. Hierbei berücksichtigt der folgende Kontrast nur die sofortigen Rückmeldungen:

- negative Rückmeldungen vs. positive Rückmeldungen

Auf Grundlage der berechneten Kontraste wurden *Volumes of interest* VOI definiert, die auf dem gewählten Signifikanzniveau eine Voxelanzahl größer als 50mm^3 umfassen. Für jedes VOI wurde der mittlere t -Wert berechnet. Anschließend wurde für jedes VOI mittels einer ROI-GLM-Analyse der Verlauf der BOLD-Antwort für die beiden Altersgruppen getrennt voneinander analysiert. Hierfür wurden die Datensätze der Einzelprobanden entsprechend ihrer Altersgruppe zusammengeführt. Dies ermöglichte eine vergleichende Analyse der im RFX-GLM ermittelten Hirnregionen getrennt nach beiden Altersgruppen. Zur Überprüfung der Hypothese (c), nach der beide Alterskohorten Unterschiede im Verlauf ihrer hämodynamischen Antwort aufweisen, wurden die gemittelten Beta Werte für die Bedingungen *Verzögerung 600 ms, positive Rückmeldungen und negative Rückmeldungen* für jeden Probanden in SPSS (PASW Statistics) eingelesen. Die Analyse der Gruppenunterschiede bezieht sich hierbei, wie die gesamte statistische Analyse der fMRT-Daten, auf die Zeitpunkte 6 s und 8 s nach Stimulusbeginn. Die Daten wurden auf Normalverteilung überprüft. Zur Analyse der Gruppenunterschiede zwischen jungen und älteren Probanden innerhalb der drei Bedingungen wurde ein t -Test für unabhängige Stichproben berechnet.

Verhaltensdaten: fMRT

Die Mittelwerte der Reaktionszeiten und die Fehlerrate der Probanden aus dem fMRT-Experiment wurden aus den aufgezeichneten Logdateien berechnet. Die Verhaltensdaten

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

wurden zur statistischen Analyse in das Programm SPSS eingelesen und auf Normalverteilung überprüft. Die Mittelwerte aller Probanden und die Gruppenmittelwerte der jeweiligen Alterskohorte wurden mittels *t*-Test für verbundene Stichproben auf signifikante Unterschiede zwischen korrekten und inkorrekten Antworten in der Reaktionszeit überprüft. Die Reaktionszeiten und die Fehlerrate der jungen und älteren Probanden wurden mittels Levene-Test auf Varianzhomogenität überprüft. Danach wurde der statistische Unterschied zwischen den beiden Altersgruppen sowohl für die Reaktionszeiten als auch für die Fehlerrate mittels *t*-Test für unabhängige Stichproben berechnet.

Tasterdaten und Pupillendurchmesser

Die Logdateien der Tasterdaten wurden in Excel (Microsoft®Office Excel®2007) eingelesen. Bei Sichtung der Daten zeigte sich, dass über alle Bedingungen hinweg die Standardabweichungen für die Dauer und die Intensität der Tastendrucke unerwartet groß waren. Möglicherweise erfolgte die Lagerung des Tasters innerhalb des Scanners auf dem Bein der Probanden zu instabil bzw. gab der zur ergonomischen Anpassung an die Handhaltung untergelegte Schaumstoff nach. Die Varianzanalyse der Tasterdaten ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den experimentellen Bedingungen. Aus diesem Grund wurde keine weitere statistische Analyse auf den Tasterdaten berechnet und ein Experiment zur Tastendruckdynamik außerhalb des Scanners geplant (siehe Kapitel 6, Seite 87). Dieses sollte sicherstellen, dass Effekte der Tastendruckdynamik mit der gewählten Methode und dem vorliegenden Studiendesign messbar sind, bevor der Taster erneut im Scanner verwendet wird. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der Studie IV erscheint es zukünftig sinnvoll, die Tastendruckdynamik auch im Scanner zu erheben. Hierzu sollte der Taster nicht auf dem Bein des Probanden, sondern auf einem MR-tauglichen Tischchen platziert werden, welches an der Probandenliege zu befestigen ist und ergonomisch an die Handposition eines liegenden Probanden durch Neigung angepasst werden kann. Ein Nachgeben des Untergrunds ist zwingend zu vermeiden.

Die Sichtung der 28 Videodatensätze (siehe Abschnitt 2.6) ergab, dass unabhängig von einer Verzögerung der Rückmeldung die auditorische FM-Kategorisierungsaufgabe zu beobachtbaren Erweiterungen der Pupille führt. Unterschiede zwischen der Bedingung mit sofortigen und der Bedingung mit verzögerten Systemantworten wurden jedoch nicht gefunden. Aus diesem Grund wurde das Blinzelnverhalten der Probanden untersucht. Studien zeigen, dass spontanes Blinzeln durch emotionale Einflüsse und Aufmerksamkeitsprozesse moduliert wird (Esteban et al., 2004). Mit Hilfe einer Software (Panning, A. 2012, Magdeburg) wurde die Anzahl der Blinzelnbewegungen pro Bedingung aus den Videodateien ausgelesen. Das Experimentaldesign mit relativ kurzen Interstimulus-Intervallen von 6 bis 10 Sekunden erwies sich jedoch aufgrund des kurzen Zeitintervalls von nur 4 Sekunden als ungeeignet zur Auswertung des Blinzelnverhaltens.

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Im Durchschnitt blinzeln Menschen nur alle 4 bis 6 Sekunden einmal (Adler & Moses, 1981). Aus diesem Grund werden im Folgenden keine Ergebnisse aus der Pupillenmessung berichtet.

Verhaltensdaten: individuelle Schwellenbestimmung

Aus den Daten der Nacherhebung wurde die individuelle Schwelle jedes Probanden aus dem Mittel der letzten fünf Messwerte bestimmt. Anschließend wurden die Mittelwerte der älteren und jungen Probanden mittels *t*-Test für unabhängige Stichproben miteinander verglichen. Für jeden Probanden wurde zudem die Fehlerrate bestimmt. Da die Anzahl der absolvierten Stimuli von Proband zu Proband unterschiedlich war, wurde die Fehlerrate in Prozent berechnet. Für jede Altersgruppe wurde der Mittelwert der Fehlerrate berechnet und mittels *t*-Test für unabhängige Stichproben miteinander verglichen. Sowohl für die Wahrnehmungsschwelle als auch für die Fehlerrate wurde der Levene-Test zur Überprüfung der Varianzhomogenität in beiden Gruppen berechnet. Mittels bivariater Korrelationsanalyse wurde zudem der Zusammenhang zwischen Fehlerrate und Wahrnehmungsschwelle berechnet.

4.2.8 Ergebnisse

Verhaltensdaten: individuelle Schwellenbestimmung

Die Mittelwerte der im Anschluss an das fMRT- Experiment erhobenen Wahrnehmungsschwellen für Verzögerungen und die dazugehörigen Fehlerraten sind in Tabelle 4.4 für junge und ältere Probanden aufgelistet. Die Voraussetzungen der Varianzhomogenität sind für beide Parameter erfüllt (Schwelle: $p < 0,85$; Fehlerrate: $p < 0,06$). Der *t*-Test für unabhängige Stichproben ergab für die Schwelle ($t = -3,3; p < 0,01$) und für die Fehlerrate ($t = -4,9; p < 0,01$) einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Alterskohorten.

Die bivariate Korrelationsanalyse ergab einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen der individuellen Schwelle und der Fehlerrate der Probanden von $r = 0,41$ ($p < 0,02$). Dieser Zusammenhang ist jedoch nur über alle Probanden ($N=34$) signifikant. Wird der Faktor *Alter* aus der Korrelation herauspartialisiert, ist der Zusammenhang zwischen Fehlerrate und Wahrnehmungsschwelle nicht mehr signifikant ($p > 0,2$). Wird dagegen der Faktor *Fehlerrate*

Tabelle 4.4: Mittelwerte der Schwelle und der Fehlerrate für ältere und junge Probanden sowie der Gesamtmittelwert.

Probanden	junge	ältere	gesamt
Schwelle [ms]	327,2 (89,7)	437,3 (98,5)	366,1 (105,8)
Fehlerrate [%]	17,9 (6,9)	33,2 (11,3)	23,3 (11,3)

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

aus dem Zusammenhang zwischen Alter und Wahrnehmungsschwelle herauspartialisiert, so bleibt ein signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Variablen bestehen ($r_{v.a.f} = 0,31$; $p < 0,02$).

Verhaltensdaten fMRT

Die mittleren Reaktionszeiten und die Fehlerrate beider Altersgruppen während des fMRT-Experiments sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Die statistische Analyse über alle Probanden hinweg ergab, dass korrekte Antworten mit einer signifikant kürzeren Reaktionszeit einhergehen als inkorrekte Antworten ($t(43) = 2,47$; $p < 0,02$). Für den Vergleich korrekter und inkorrekt Antworten innerhalb der einzelnen Alterskohorten liegt sowohl für junge ($p = 0,07$) als auch für ältere Probanden ($p = 0,07$) kein signifikanter Unterschied vor.

Die Voraussetzung der Varianzhomogenität in beiden Altersgruppen ist für die Reaktionszeit ($p > 0,46$) und für die Fehlerrate ($p > 0,20$) erfüllt. Der Unterschied der Reaktionszeiten zwischen beiden Altersgruppen ist nicht signifikant. Nur die Fehlerraten junger und älterer Probanden unterscheiden sich signifikant voneinander ($t(42) = -6,35$; $p < 0,01$). Ältere Probanden machen signifikant mehr Fehler als junge Probanden.

In der Nachbefragung anhand des Fragebogens gaben 6 junge und 7 ältere Probanden an die Verzögerung der Rückmeldung während des fMRT-Experiments nicht bemerkt zu haben, bzw. konnten sie sich im Anschluss an das Experiment nicht bewusst an verzögerte Rückmeldungen erinnern. Verglichen mit den Gruppenmittelwerten der Verhaltensdaten weisen diese Probanden keinen statistisch signifikanten Unterschied innerhalb der erhobenen Verhaltensparameter auf. Auch in der nachfolgenden Schwellenbestimmung (siehe folgender Abschnitt) unterscheiden sie sich nicht von den Gruppenmittelwerten.

fMRT

Verzögerungen der Systemantwort von 600 ms rufen in einer Vielzahl von Hirnregionen stärkere Aktivierungen hervor als sofortige Systemantworten (siehe Tabelle 4.6). Die auf einem Signifikanzniveau von $FDR < 0,05$ aktivierten Regionen umfassen vor allem frontale Areale (pMFC, GFI) und bilateral die anteriore Insel (aI). Das größte Aktivierungscluster findet sich im

Tabelle 4.5: Mittelwerte und Standardabweichung (in Klammern) der Reaktionszeiten [ms] korrekter und inkorrekt Antworten und die Fehlerrate [%] der beiden Altersgruppen.

	junge	ältere	gesamt
RT korrekt [ms]	847,8 (139,4)	842,9 (149,8)	845,5 (142,8)
RT inkorrekt [ms]	905,3 (150,5)	869,6 (181,4)	888,3 (164,9)
Fehler [%]	16,1 (8,3)	35,4 (11,7)	25,3 (13,9)

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

linken Lobus parietalis inferior (LPI). Im Vergleich zu sofortigen Systemantworten weisen anteriore und posteriore Anteile des Gyrus cinguli stärkere Deaktivierungen der hämodynamischen Antwort während verzögerter Systemantworten auf. Deaktivierungen sind auf die Abnahme der Signalintensität während der Experimentalbedingungen im Vergleich zur Ruhephase zurückzuführen.

Verzögerungen der Systemantwort von 400 ms aktivieren auf dem gewählten Signifikanzniveau von $FDR < 0,05$ nur wenige Hirnregionen stärker als sofortige Systemantworten (siehe Tabelle 4.7). Insbesondere im pMFC und im LPI nehmen die Aktivitätsunterschiede im Vergleich zu Verzögerungen von 600 ms ab. Die rechte aI weist die höchste Anzahl aktivierter Voxel auf.

Die Berechnung des Kontrastes zwischen den verzögerten Systemantworten von 200 ms und den sofortigen Systemantworten ergab in keiner Hirnregion einen signifikanten Unterschied. Es ist davon auszugehen, dass minimale Verzögerungen von 200 ms keinen Einfluss auf das zuvor identifizierte Netzwerk an Hirnregionen ausüben.

Tabelle 4.6: Regionen mit stärkerer Aktivität während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen ($FDR < 0.05$).

Region	Talairach			Hemisphäre	BA	Voxelanzahl	t-Wert
	x	y	z				
Aktivierung							
Gyrus frontalis medialis posterior	4	12	45	links/rechts	6	2795	4,44
Gyrus frontalis inferior	44	7	28	rechts	9	3231	4,29
Insula anterior	35	19	5	rechts	13	2556	4,63
Insula anterior	-33	17	5	links	13	2409	4,72
Gyrus precentralis	-48	2	31	links	6	920	3,99
Lobus parietalis inferior	-44	-30	48	links	40	5088	4,07
Thalamus	-10	-16	9	links		989	4,48
Thalamus	10	-13	9	rechts		896	4,54
Deaktivierung							
Gyrus cinguli anterior	0	37	-6	rechts/links	32	140	-3,87
Gyrus cinguli anterior	-1	47	-6	rechts/links	32	183	-3,87
Gyrus cinguli posterior	-3	-53	24	links	31	486	-3,97
Gyrus temporalis medius	-40	-68	27	links	39	499	-4,18

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Die weitere Analyse der Daten erfolgte auf Grundlage des Kontrastes zwischen den um 600 ms verzögerten Systemantworten und sofortigen Rückmeldungen. Die ROIs (siehe Tabelle 4.6) wurden für jede Alterskohorte getrennt in einem ROI-GLM analysiert (siehe Anhang B, Tabellen B.1 und B.2). Ausgewählte ROIs dieser Analyse sind in den Abbildungen 4.2 bis 4.6 dargestellt. Neben der Aktivierungskarte veranschaulichen die Abbildungen 4.2 bis 4.6 den Verlauf der BOLD-Antwort junger und älterer Probanden. Die ROI-Analyse zeigt, dass in beiden Altersgruppen die Stärke der BOLD-Antwort mit der Länge der Verzögerung ansteigt.

Vergleicht man die Signalverläufe junger und älterer Probanden miteinander, so ist zu erkennen, dass nur in wenigen Regionen Unterschiede zwischen beiden Alterskohorten auftreten. Die Ergebnisse des statistischen Vergleichs zu den Zeitpunkten 6 s und 8 s nach Stimulusbeginn sind in Tabelle 4.8 aufgeführt. Während verzögerter Rückmeldungen unterscheiden sich beide Altersgruppen in den meisten Regionen nicht signifikant voneinander. Die Hypothese (c), wonach Verzögerungen der Systemantwort einen geringeren Effekt auf die Hirnaktivität älterer Probanden im Vergleich zu jungen Probanden ausüben, kann daher nicht bestätigt werden. Eine Ausnahme bildet der ACC. Hier unterscheiden sich beide Altersgruppen während verzögerter und sofortiger Rückmeldungen zum Zeitpunkt 8 s nach Stimulusbeginn voneinander. Junge Probanden weisen in dieser Region eine deutliche Deaktivierung während der drei Verzögerungsbedingungen auf. In der Gruppe der älteren Probanden kommt es dagegen nur während um 600 ms verzögerter Rückmeldungen zu einer signifikanten Deaktivierung im Vergleich zur Baseline (siehe Anhang B, Tabelle B.1 und B.2). Aber auch diese Deaktivierung ist im Vergleich zu jungen Probanden signifikant geringer (siehe Tabelle 4.8).

Tabelle 4.7: Regionen mit stärkerer Aktivität während verzögerter Rückmeldungen (400 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen ($FDR < 0,05$).

Region	Talairach			Hemisphäre	BA	Voxelanzahl	t-Wert
	x	y	z				
Aktivierung							
Gyrus frontalis medialis posterior	4	14	44	links/rechts	6	45	4,67
Gyrus frontalis medialis posterior	-8	7	43	links	24	55	4,84
Gyrus frontalis inferior	45	3	32	rechts	9	697	4,77
Insula anterior	36	19	8	rechts	13	1059	4,92
Insula anterior	-32	18	7	links	13	384	4,70
Lobus parietalis inferior	-44	-32	48	links	40	45	4,43

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

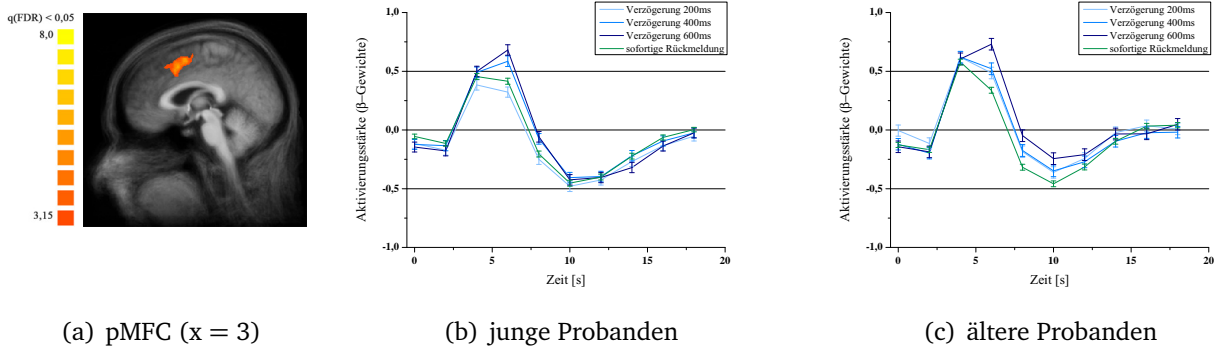


Abbildung 4.2: Stärkere Aktivierung im posterioren medialen Frontalkortex (a) während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals (b) und (c) weisen nur Verzögerungen von 400 ms und 600 ms signifikante Unterschiede zu sofortigen Rückmeldungen auf. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

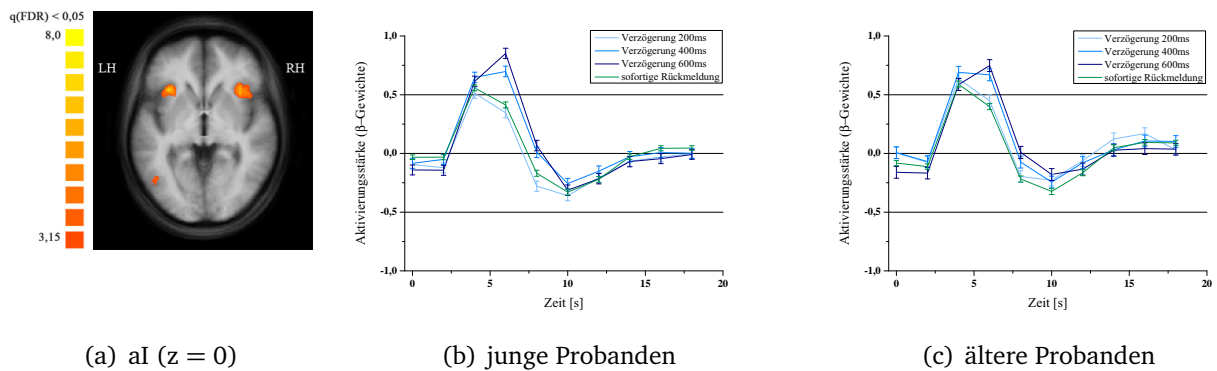


Abbildung 4.3: Stärkere Aktivierung in der anterioren Insel (a) während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals (b) und (c) weisen nur Verzögerungen von 400 ms und 600 ms signifikante Unterschiede zu sofortigen Rückmeldungen auf.

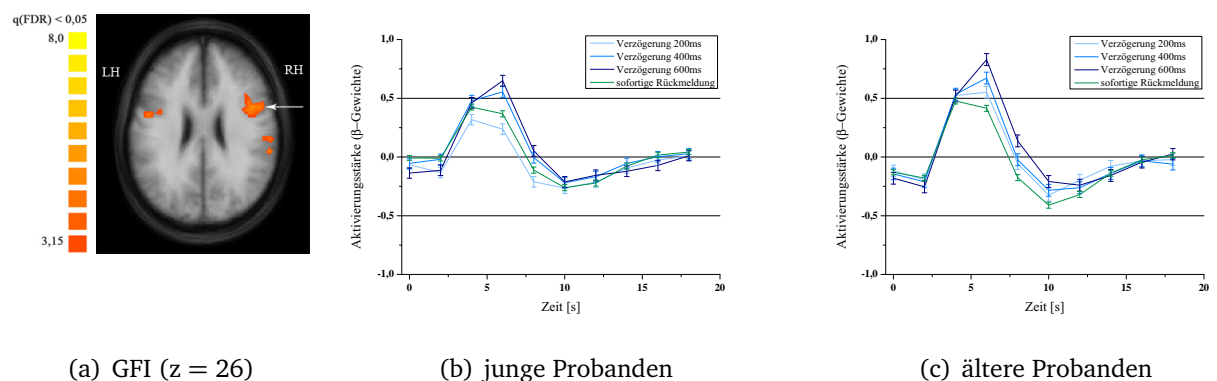


Abbildung 4.4: Stärkere Aktivierung im Gyrus frontalis inferior (a) während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals (b) und (c) weisen nur Verzögerungen von 400 ms und 600 ms signifikante Unterschiede zu sofortigen Rückmeldungen auf.

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

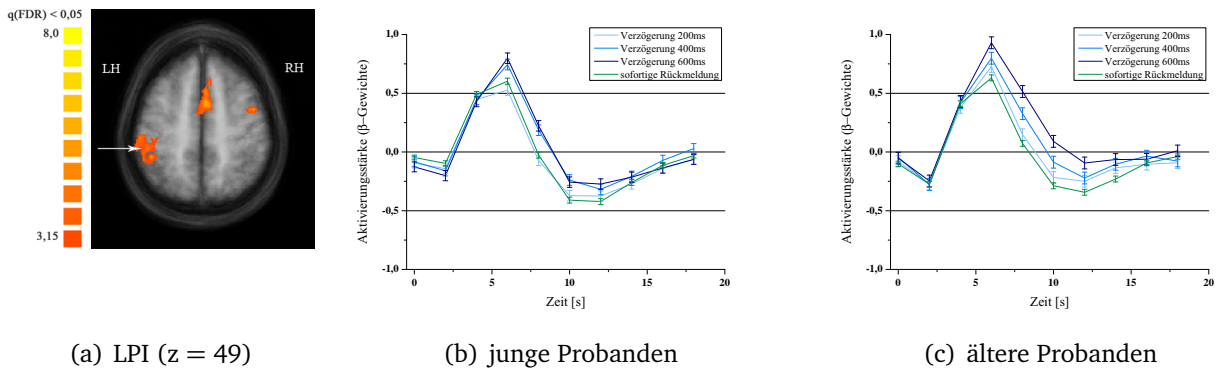


Abbildung 4.5: Stärkere Aktivierung im Lobus parietalis inferior (a) während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals (b) und (c) weisen nur Verzögerungen von 400 ms und 600 ms signifikante Unterschiede zu sofortigen Rückmeldungen auf.

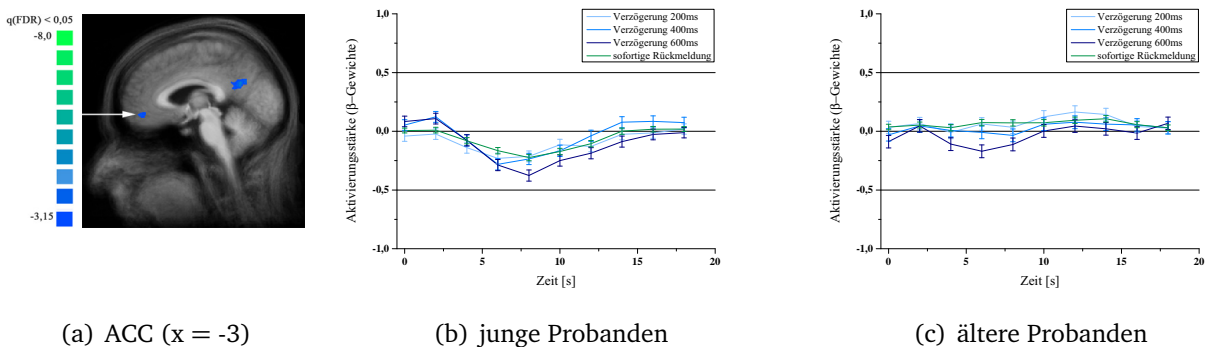


Abbildung 4.6: Stärkere Deaktivierung im anterioren Gyrus cinguli (a) während verzögerter Rückmeldungen (600 ms) im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals der jungen Probanden (b) führen alle Bedingungen zu einer Deaktivierung. In der Gruppe der älteren Probanden (c) führen nur Verzögerungen von 600 ms zu einer verstärkten Deaktivierung.

Tabelle 4.8: Vergleich der BOLD-Kurven junger und älterer Probanden zu den Zeitpunkten 6 s und 8 s nach Stimulusbeginn für sofortige und verzögerte Rückmeldungen (RM). Auflistung der t -Werte und der p -Werte in Klammern. Signifikante Werte sind hervorgehoben.

	t = 6 s		t = 8 s	
	sofortige RM	verzögerte RM	sofortige RM	verzögerte RM
pMFC	0,79 (0,44)	-0,77 (0,45)	0,97 (0,34)	-0,19 (0,85)
aI	-0,13 (0,89)	0,66 (0,51)	0,21 (0,84)	0,28 (0,78)
LPI	00,07 (0,94)	-0,83 (0,41)	-0,48 (0,63)	-1,82 (0,07)
GFI	-0,80 (0,43)	-2,25 (0,03)	0,42 (0,68)	-0,91 (0,37)
ACC	-2,63 (0,01)	-1,31 (0,19)	-3,16 (0,01)	-2,82 (0,01)

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Mehrere Probanden gaben in der Nachbefragung an, die Verzögerungen während des Experiments nicht bemerkt zu haben. Es wurde vermutet, dass sich die neuronale Aktivität dieser Probanden vom Rest der Gruppe unterscheidet. Aus diesem Grund wurden sie getrennt von der Gruppe analysiert. Hierfür wurden pro Alterskohorte ROI-GLMs (FFX) auf Grundlage der fünf größten ROI der Gruppenanalyse (pMFC, linke und rechte aI, GFI, LPI) berechnet. Die Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen B.3 und B.4 aufgelistet und zeigen, dass verzögerte SRZ auch dann die neuronale Aktivität beeinflussen, wenn die Verzögerungen vom Nutzer nicht bewusst wahrgenommen und somit nicht als störend interpretiert werden. Wie bereits die Gesamtgruppenanalyse zeigt, steigt die neuronale Aktivität mit der Dauer der Verzögerung an. Während sich Verzögerungen von 200 ms nicht von sofortigen Rückmeldungen unterscheiden lassen, führen auch in dieser Probandengruppe Verzögerungen von 600 ms zu der stärksten neuronalen Aktivität im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen.

Tabelle 4.9: Regionen mit stärkerer Aktivität während sofortiger inkorrektter Rückmeldungen im Vergleich zu korrekten Rückmeldungen ($FDR < 0,01$).

Region	Talairach			Hemisphäre	BA	Voxelanzahl	t-Wert
	x	y	z				
Aktivierung							
Gyrus frontalis medialis posterior	1	19	44	links/rechts	6	10657	4,97
Gyrus frontalis medius	46	22	25	rechts	9	679	4,42
Insula anterior	39	19	2	rechts	13	3082	4,80
Insula anterior	-37	18	2	links	13	5494	5,28
Putamen	-22	6	-1	links		752	-4,78
Putamen	23	5	-1	rechts		1498	-5,05
Nucleus caudatus	-11	5	-4	links		306	-4,63
Nucleus caudatus	12	6	-4	rechts		525	-4,77
Deaktivierung							
Gyrus cinguli anterior	-3	44	-1	rechts/links	32	2936	-4,70
Gyrus cinguli anterior	11	35	0	rechts	32	291	-4,39
Gyrus cinguli posterior	-2	-52	18	rechts/links	31	2891	-4,64
Gyrus frontalis superior	-21	19	47	links	8	1192	-4,85
Gyrus temporalis medius	-41	-64	25	links	39	3202	-4,85
Gyrus temporalis superior	45	-59	19	rechts	39	377	-4,36
Gyrus temporalis inferior	-43	-68	1	links	37	384	-4,27

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Ausgehend von den Ergebnissen des ersten Kontrastes, wurde nachfolgend der direkte Vergleich zwischen negativen und positiven Rückmeldungen berechnet. Die Ergebnisse der Tabelle 4.9 bestätigen, dass einige Regionen, die durch verzögerte Systemantworten stärker aktiviert werden auch durch negative Rückmeldungen stärker aktiviert werden. Zu diesen Regionen zählen der pMFC und bilateral die aI (siehe Abbildung 4.7 und 4.8). Die Aktivitätsunterschiede liegen zudem auf einem deutlich höheren Signifikanzniveau ($FDR < 0,01$). Neben den bereits im ersten Kontrast identifizierten Hirnregionen, treten Aktivitätsunterschiede bilateral im Putamen und im Nucleus caudatus auf. Innerhalb dieser Regionen, führen positive Rückmeldungen zu einer stärkeren Aktivität als negative Rückmeldungen (siehe Abbildung 4.10).

Zur statistischen Analyse der Gruppenunterschiede wurden die Signalverläufe zu den Zeitpunkten $t = 6\text{ s}$ und $t = 8\text{ s}$ der älteren und jungen Probanden miteinander verglichen. In Tabelle 4.10 sind die Ergebnisse der Analyse aufgelistet. Im ROI des pMFC und der aI liegen während negativer Rückmeldung signifikante Aktivitätsunterschiede zwischen beiden Altersgruppen vor. Junge Probanden zeigen während negativer Rückmeldungen einen deutlichen Anstieg der Aktivität im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Die Signalintensität in der Gruppe der älteren Probanden unterscheidet sich während negativer Rückmeldungen nicht von der Signalintensität während positiver Rückmeldungen (siehe Abbildung 4.7 und 4.8).

Im ROI des Putamen unterscheiden sich beide Altersgruppen zum Zeitpunkt $t = 8\text{ s}$ sowohl während positiver als auch während negativer Rückmeldungen signifikant voneinander. Besonders der Verlauf der BOLD-Antwort während negativer Rückmeldungen unterscheidet sich zwischen jungen und älteren Probanden (siehe Abbildung 4.10). Innerhalb der jungen Probanden steigt der Signalintensität nur minimal an und bleibt deutlich unter dem Signalverlauf positiver Rückmeldungen. In der Gruppe der älteren Probanden kommt es im Verlauf der ersten 4 s zu einem deutlichen Anstieg der Signalintensität gefolgt von einem Abfall der Signalintensität. Dieser *undershoot* fällt stärker aus als in der Gruppe der jungen Probanden. Infolgedessen unterscheiden sich beide Altersgruppen zu diesem Zeitpunkt ($t = 8\text{ s}$) signifikant voneinander.

Tabelle 4.10: Vergleich der BOLD-Kurven junger und älterer Probanden zu den Zeitpunkten 6 s und 8 s nach Stimulusbeginn für sofortige Rückmeldungen (RM) und falsche Antworten (negative Rückmeldungen). Auflistung der *t*-Werte und der *p*-Werte in Klammern. Signifikante Werte sind hervorgehoben.

	t = 6 s		t = 8 s	
	sofortige RM	negative RM	sofortige RM	negative RM
pMFC	0,20 (0,84)	2,10 (0,04)	0,49 (0,62)	4,75 (0,00)
aI	-0,76 (0,45)	2,01 (0,05)	0,22 (0,83)	3,72 (0,00)
Putamen	3,61 (0,00)	-0,19 (0,85)	5,93 (0,00)	5,95 (0,00)
GFI	-0,56 (0,58)	1,35 (0,18)	-0,18 (0,85)	2,01 (0,05)
ACC	-2,42 (0,02)	-1,97 (0,06)	-2,42 (0,02)	-0,56 (0,58)

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

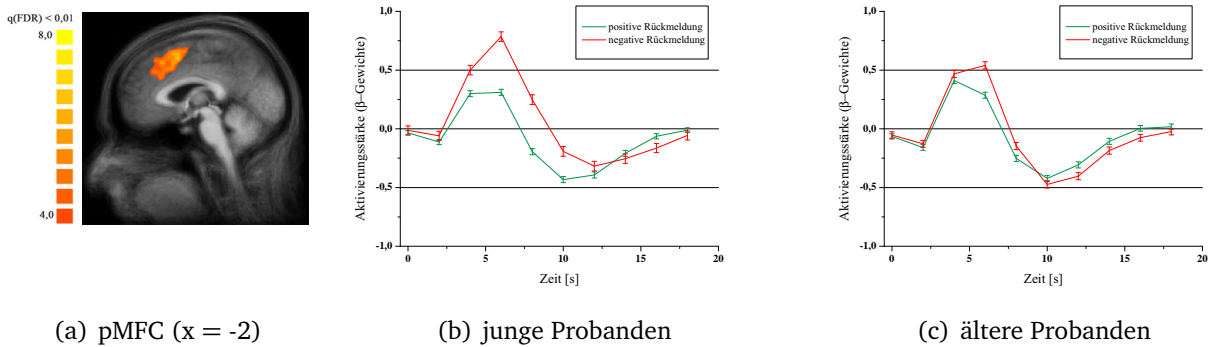


Abbildung 4.7: Stärkere Aktivierung im posterioren medialen Frontalkortex (a) während (sofortiger) negativer Rückmeldungen im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Negative Rückmeldungen führen sowohl bei älteren (b), aber besonders deutlich bei jüngeren Probanden (c) zu einer erhöhten Aktivität im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

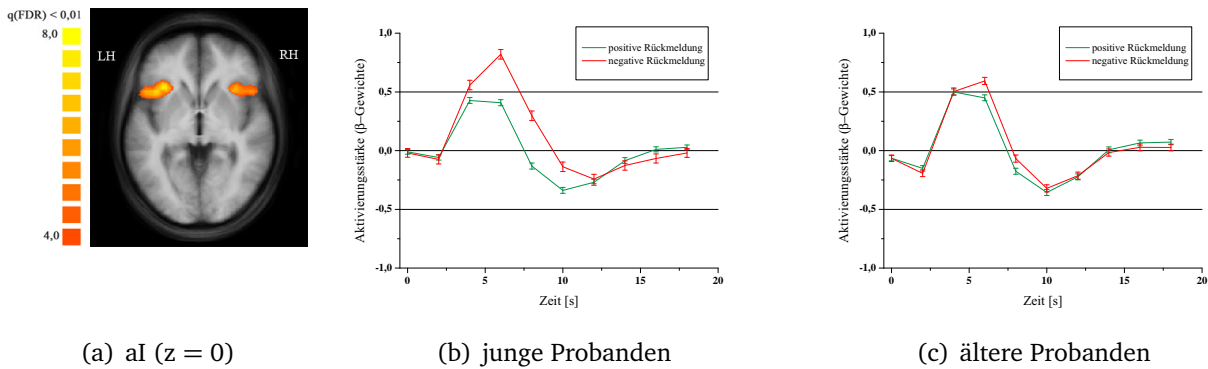


Abbildung 4.8: Stärkere Aktivierung in der anterioren Insula (a) während (sofortiger) negativer Rückmeldungen im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Negative Rückmeldungen führen besonders bei jungen (b) aber auch bei älteren Probanden (c) zu einer erhöhten Aktivität im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

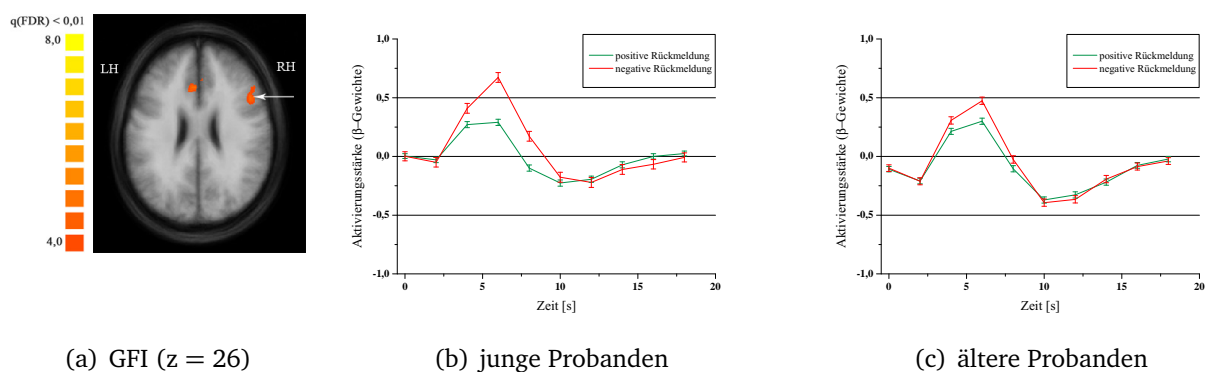


Abbildung 4.9: Stärkere Aktivierung des inferioren Frontalkortex (a) während (sofortiger) negativer Rückmeldungen im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Negative Rückmeldungen führen besonders bei jungen (b) aber auch bei älteren Probanden (c) zu einer erhöhten Aktivität im Vergleich zu positiven Rückmeldungen.

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

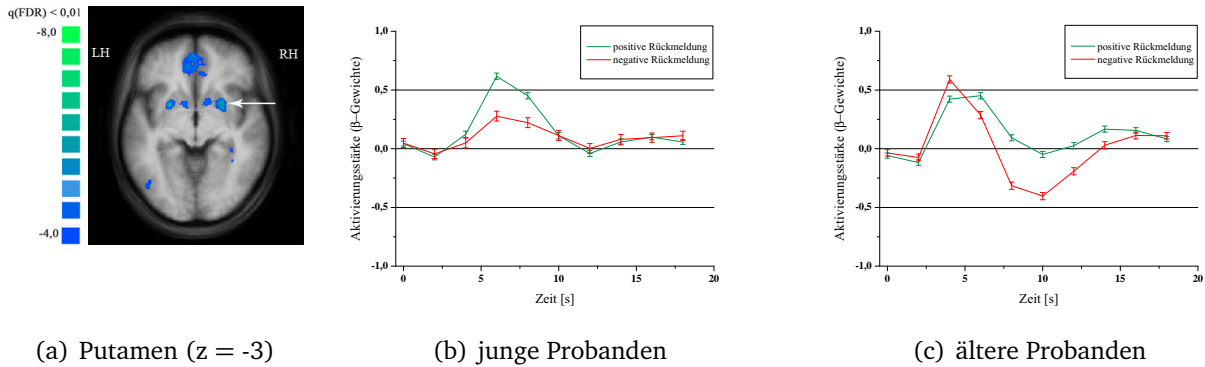


Abbildung 4.10: Geringere Aktivierung im Putamen (a) während (sofortiger) negativer Rückmeldungen im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Im Vergleich zu positiven Rückmeldungen führen negative Rückmeldungen bei jungen Probanden (b) zu einer signifikant geringeren Aktivität. Bei älteren Probanden (c) kommt es erst spät zu einem verstärkten undershoot während negativer Rückmeldungen. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

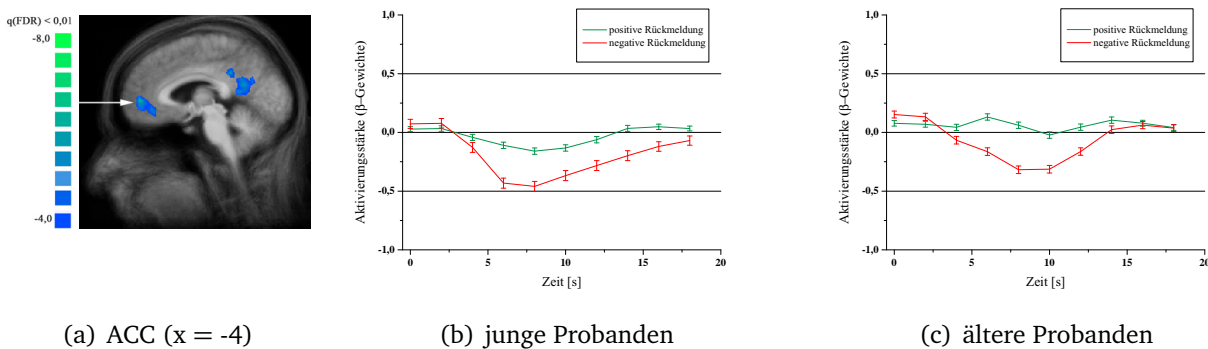


Abbildung 4.11: Stärkere Deaktivierung im anterioren Gyrus cinguli (a) während (sofortiger) negativer Rückmeldungen im Vergleich zu positiven Rückmeldungen. Im Verlauf des BOLD-Signals der jungen Probanden (b) führen beide Experimentalbedingungen zu einer Deaktivierung. Bei älteren Probanden (c) kommt es nur während negativer Rückmeldungen zu einer Deaktivierung. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

4.2.9 Diskussion

4.2.9.1 allgemeine Diskussion

Die Analyse der fMRT-Daten zeigt, dass es in Abhängigkeit von der Dauer einer Verzögerung der Systemantwort zu einer erhöhten Aktivität in verschiedenen Hirnregionen kommt und bestätigt damit die Hypothesen (a) und (b). Während Verzögerungen von 200 ms keinen Einfluss auf das identifizierte Netzwerk ausüben, kommt es nach Verzögerungen von 400 ms und besonders nach 600 ms zu einer erhöhten Aktivität im pMFC, bilateral in der aI, dem GFI und dem linken LPI. Weiterhin kommt es zu einer signifikanten Deaktivierung im Bereich des ACC und PCC nach verzögerten Systemantworten. Selbst Probanden, die angaben, die Verzögerungen nicht bemerkt zu haben, weisen während verzögerter Systemantworten einen Anstieg der Aktivität in den genannten Hirnregionen auf.

Mit Ausnahme des ACC unterscheiden sich junge und ältere Probanden während verzögerter Systemantworten in den identifizierten Hirnregionen nicht voneinander. Hypothese (c), nach der Verzögerungen einen geringeren Effekt auf die Hirnaktivität älterer Probanden ausüben, kann daher nicht bestätigt werden. Einzig im ACC liegt unter der Bedingung einer um 600 ms verzögerten Rückmeldung ein signifikanter Unterschied zwischen jungen und älteren Probanden vor. Aus diesem Grund erfolgt die Diskussion dieser Region besonders im Hinblick auf Altersunterschiede.

Die Auswertung der negativen Rückmeldungen zeigt, dass diese das gleiche Netzwerk aus pMFC, aI, GFI, ACC und PCC aktivieren wie verzögerte Systemantworten. Vor allem im pMFC und der linken aI führen negative Rückmeldungen zudem zu einer größeren Anzahl signifikanter Voxel als die Bedingung mit verzögerten Systemantworten. Einzig die Aktivität im LPI, die durch verzögerte Systemantworten signifikant erhöht wird, kann durch negative Rückmeldungen nicht verstärkt werden. Anders als unter der Bedingung der verzögerten Rückmeldungen finden sich in der Bedingung mit negativen Rückmeldungen signifikante Unterschiede zwischen jungen und älteren Probanden. Möglicherweise ist dies auf die schlechtere Leistung der älteren Probanden bei der auditorischen Kategorisierungsaufgabe zurückzuführen und steht im folgenden Abschnitt ebenfalls zur Diskussion.

Zusätzlich zum Netzwerk aus pMFC, aI, GFI, ACC und PCC kommt es im Bereich des Belohnungssystems im Putamen und Nucleus caudatus zu Aktivitätsunterschieden zwischen positiven und negativen Rückmeldungen, mit einer signifikant erhöhten Aktivität während positiver Rückmeldungen.

Im Folgenden werden die aus der Literatur bekannten Aufgaben der einzelnen Hirnregionen des identifizierten Netzwerks diskutiert. Weiterhin wird versucht zu klären, warum im vorliegenden Experiment Verzögerungen der Systemantwort und negative Rückmeldungen zu Aktivitätsunterschieden in ähnlichen Hirnregionen führen.

4.2.9.2 Hirnareale

Anteriore Insel / Gyrus frontalis inferior

Sowohl verzögerte Systemantworten als auch negative Rückmeldungen führen bilateral in der anterioren Insel (aI) zu einer erhöhten Aktivität. Bereits Verzögerungen von 400 ms verstärken die Aktivität in dieser Hirnregion. Auffällig ist, dass negative Rückmeldungen in der linken aI eine größere Voxelanzahl aktivieren als in der rechten aI.

Die Ergebnisse bildgebender Studien lassen vermuten, dass die aI eine elementare Rolle für das menschliche Bewusstsein spielt. Zahlreiche Studien scheinen den Befund zu stützen, dass die Aktivierung der aI als neuronales Korrelat der Aufmerksamkeit interpretiert werden kann und entscheidend zum menschlichen Bewusstsein beiträgt (für einen Überblick siehe Craig (2009)). Der insuläre Kortex ist Bestandteil des limbischen Systems und erhält viszerale Informationen über den physiologischen Zustand des Körpers. Diese interozeptiven Stimuli werden von posterioren Anteilen der Insel in anteriorer Richtung zusammengeführt. Die Integration der Informationen über den physiologischen Zustand ermöglicht die bewusste Wahrnehmung von komplexen Gefühlszuständen in der aI (Wittmann, 2009). Besonders verdeutlicht wird diese Integration von posterior nach anterior durch eine Studie von Kong et al. (2006). Während die neuronale Aktivität der posterioren Insel mit der objektiven Intensität eines applizierten Hitzeschmerzes korrelierte, wies die Aktivität der anterioren Insel einen Zusammenhang mit der subjektiven Bewertung des Schmerzreizes auf (Kong et al., 2006). Andere Studien schlussfolgern, dass die Aktivität der aI mit dem Prozess der Selbstwahrnehmung (Devue et al., 2007) und emotionalem Bewusstsein in Beziehung steht (Craig, 2009). Craig (2009) schließt aus den Ergebnissen der verschiedenen Studien, dass die Aktivität der aI nicht nur mit physiologischen Empfindungen einhergeht, sondern dass die aI durch alle subjektiven Gefühle aktiviert wird. So fanden auch Abler et al. (2005) eine erhöhte Aktivität in der rechten aI, die durch das Ausbleiben eines erwarteten belohnenden Ereignisses ausgelöst wird. Diese Erfahrung, ein Handlungsziel nicht zu erreichen, geht mit dem Gefühl der Frustration einher (Abler et al., 2005). Möglicherweise besitzen die in der vorliegenden Studie verzögerten Systemantworten das Potential, Frustration beim Probanden auszulösen, da sie unerwartet auftreten, nicht beeinflussbar sind und das Ergebnis der ausgeführten Handlung verzögern. Eine weitere Studie von Brass & Haggard (2007), die die neuronale Aktivität nach Handlungsabbrüchen untersucht, unterstützt den Befund. Brass & Haggard (2007) schlussfolgern, dass die Aktivität der aI die affektiv-somatische Konsequenz auf den frustrierenden Abbruch einer bereits geplanten Handlung widerspiegelt.

Zusammen mit dem angrenzenden GFI scheint die aI zudem zentral für die Wahrnehmung der Zeit zu sein (Craig, 2009). So konnten Bushara et al. (2001) zeigen, dass die rechte aI aktiviert wird, wenn visuell-auditorische Stimuli, die normalerweise synchron auftreten, zeitlich versetzt präsentiert werden. Craig (2009) subsumiert, dass die aI eine zentrale Komponente eines

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

neuronalen Korrelates der Zeitwahrnehmung ist und eine entscheidende Rolle in der bewussten Wahrnehmung des unmittelbaren Augenblicks spielt. Möglicherweise führte die verspätete und damit zeitlich nicht mehr kontingente Rückmeldung im vorliegenden Experiment zu einer erhöhten Aktivität in der aI und dem GFI.

Die Aktivität in der aI wird außerdem mit Aufmerksamkeit (Weissman et al., 2006) und kognitiven Entscheidungs- und Intentionsprozessen in Verbindung gebracht (Craig, 2009). Zumeist kommt es zur gleichzeitigen Aktivierung des ACC bzw. des pmFC (siehe folgender Abschnitt, Seite 73). Beide Regionen bilden den Kern eines neuronalen Netzwerks zur aufgabenabhängigen Kontrolle zielgerichteten Verhaltens (Dosenbach et al., 2007). Während der ACC an der Detektion und/oder dem Auflösen von Konflikten beteiligt ist, scheint die aI (zusammen mit dem GFI) die Aufmerksamkeit auf die salienten Stimuli auszurichten (Eckert et al., 2009; Weissman et al., 2006). Seeley et al. (2007) gehen davon aus, dass die Aktivität der aI und des ACC vom Grad der persönlichen Salienz eines Ereignisses/Stimulus abhängt und aufgabenunabhängig auftritt. Sie ordnen die aI und den ACC einem „Salienz-Netzwerk“ zu, das vom „Netzwerk der exekutiven Kontrolle“ abgegrenzt werden kann. Diese Interpretation steht im Einklang mit der erhöhten Aktivität der aI innerhalb der vorliegenden Studie. Sowohl verzögerte Systemantworten als auch negative Rückmeldungen sind für das Verhalten des Probanden von Bedeutung und rufen als saliente Ereignisse im Vergleich zu sofortigen und positiven Rückmeldungen eine stärkere Aktivität in dem von Seeley et al. (2007) identifizierten „Salienz-Netzwerk“ hervor.

Posteriorer medialer Frontalkortex

Negative Rückmeldungen führen zu den stärksten Aktivitätsunterschieden innerhalb des pmFC und aktivieren eine größere Voxelanzahl als verzögerte Systemantworten. Die signifikanten Aktivitätsunterschiede negativer Rückmeldungen erstrecken sich in weiter anterior gelegene Anteile des pmFC als die signifikanten Voxel verzögerter Systemantworten (vgl. Abbildung 4.7(a) und 4.2(a)).

Der ACC und der ihn umfassende pmFC sind an der Überwachung des Verhaltens (*performance monitoring*) und der Bewertung eines Handlungsziels beteiligt (Rushworth et al., 2004). Die Bewertung des Handlungsergebnisses hängt von den Erwartungen des Organismus ab. Weicht das erwartete Ziel vom tatsächlichen Handlungsergebnis ab, muss das Verhalten des Organismus an die neue Situation angepasst werden (Kerns et al., 2004; Rushworth et al., 2004). Besonders Fehlersignale verletzen die Erwartung eines Handlungsergebnisses. In verschiedenen fMRT-Studien führten externe aber auch interne Fehlersignale zu einem Anstieg der Aktivität im pmFC/ACC (Daniel & Pollmann, 2012; Holroyd et al., 2004; Kerns et al., 2004; Rushworth et al., 2004). Auch EEG-Studien konnten eine ereigniskorrelierte Komponente nach Fehlern und/oder negativen Rückmeldungen identifizieren, deren Ursprung in medialen frontalen Regionen liegt (Holroyd & Coles, 2002; Scheffers & Coles, 2000). Diese *Error related negativity* (ERN) wird mit

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

der gleichzeitigen phasischen Unterdrückung des Dopaminsignals aus dem Striatum in Verbindung gebracht, da der pmFC/ACC afferente und efferente Verbindung zum dopaminergen Belohnungssystem des Striatum aufweist (Holroyd & Coles, 2002). Das Ausbleiben des Dopaminsignals führt somit zu einem Anstieg der ACC-Aktivität. Aber die Aktivität im pmFC wird nicht ausschließlich durch Fehlersignale hervorgerufen. So kann u.a. die *Feedback error related negativity* (fERN) auch durch neutrale Rückmeldungen ausgelöst werden (Holroyd et al., 2006). Dies deutet darauf hin, dass der fERN ein Bewertungssystem zu Grunde liegt, welches Handlungsergebnisse entsprechend ihrer Zielerreichung klassifiziert (Holroyd et al., 2006). Nach Brown & Braver (2005) spiegelt die Stärke der pmFC-Aktivität den Grad der Abweichung des tatsächlichen vom erwarteten Ergebnis wider. Dies deutet darauf hin, dass der pmFC Ereignisse codiert, die schlechter als erwartet sind. Die Verzögerungen der Rückmeldungen im vorliegenden Experiment suggerierten den Probanden kurzzeitig, dass ihr Handlungsziel nicht erreicht wurde. Möglicherweise war dieses Signal ausreichend, um Prozesse der Verhaltensanpassung anzustoßen. Dass der pmFC nicht nur durch Fehler aktiviert wird, sondern auch durch konfliktreiche Ereignisse, zeigen die Arbeiten von Kerns et al. (2004), Forster & Brown (2011) und Limongi et al. (2013). Besonders die Studie von Forster & Brown (2011) stützt die Befunde des vorliegenden Experiments. Sie untersuchten, ob unabhängig von der Valenz einer Rückmeldung ein Fehler in der zeitlichen Vorhersage der Rückmeldung die Aktivität im pmFC erhöht. Hierfür variierten sie den Zeitpunkt der Feedbackpräsentation. Sie fanden eine erhöhte pmFC-Aktivität nach unerwartet verzögerten Rückmeldungen. In der gleichen Region führten auch negative Rückmeldungen zu einer erhöhten Aktivität. Möglicherweise spiegelt die Aktivität dieser Regionen nicht nur einen Fehler in der Valenz eines Ereignisses wider, sondern auch einen Fehler in der zeitlichen Vorhersage eines Ereignisses (Forster & Brown, 2011). Sie vermuten, dass die neuronale Repräsentation eines erwarteten Handlungsresultats einer zeitlichen Struktur unterliegt, da Handlungsziele zu einer spezifischen Zeit erwartet werden. Diese Ergebnisse von Forster & Brown (2011) stehen im Einklang mit den Befunden von Kohrs et al. (2012), die einen Anstieg der Aktivität während unerwartet verzögerter Rückmeldungen im pmFC beobachten konnten. Limongi et al. (2013) zeigen ebenfalls in ihrer Studie, dass vor allem Fehler in der zeitlichen Vorhersage eines Ereignisses zum Anstieg der Aktivität im Bereich des rechten pmFC (im „*anteriore mid-cingulate cortex*“) und der rechten aI führen.

In der Bedingung mit negativen Rückmeldungen weist der pmFC ebenso wie die aI einen signifikanten Aktivitätsunterschied zwischen den beiden Altersgruppen der vorliegenden Studie auf. Möglicherweise ist der Unterschied auf die unterschiedliche Leistung der beiden Altersgruppen in der FM-Kategorisierungsaufgabe zurückzuführen. Die Analyse der Verhaltensdaten hat gezeigt, dass ältere Probanden signifikant häufiger inkorrekt antworten (35,4%) als junge Probanden (16,1%). Die fMRT-Daten zeigen, dass die Aktivität während negativer Rückmeldungen in der Gruppe der älteren Probanden signifikant geringer ist als in der Gruppe der jungen

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Probanden. Dies lässt vermuten, dass die Häufigkeit negativer Rückmeldungen einen Einfluss auf die neuronale Aktivität im pMFC und der aI hat. Jessup et al. (2010) konnten mittels einer Glücksspielaufgabe zeigen, dass die sonst typische Aktivität im pMFC nach Fehlern abnimmt und sich umkehrt, wenn negative Rückmeldungen häufiger auftreten als positive belohnende Rückmeldungen. Auch die Ergebnisse von Brown & Braver (2005) deuten darauf hin, dass die Stärke der Aktivität im pMFC von der erwarteten Wahrscheinlichkeit eines Fehlers abhängt. Je niedriger die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers ist und je unerwarteter dieser somit auftritt, desto größer ist die Aktivität innerhalb des pMFC (Brown & Braver, 2005). Für das vorliegende Experiment ist anzunehmen, dass die erwartete Wahrscheinlichkeit einer negativen Rückmeldung in der Gruppe der älteren Probanden höher war als in der Gruppe der jungen Probanden. Infolgedessen führten negative Rückmeldungen bei den älteren Probanden zu einer signifikant geringeren Aktivität im pMFC als bei jungen Probanden.

Lobus parietalis inferior

Im vorliegenden Experiment ist der Lobus parietalis inferior die einzige Hirnregion, in der verzögerte, nicht aber negative Rückmeldungen zu einem Aktivitätsanstieg führen (siehe Abbildung 4.5). Junge und ältere Probanden unterscheiden sich in ihrer BOLD-Antwort innerhalb dieser Region nicht voneinander. Möglicherweise führen die Verzögerungen in der Rückmeldung zur Verunsicherung der Probanden, ob ihre Eingabe vom System registriert wurde und stoßen neuronale Prozesse der Handlungsplanung an, um die Eingabe zu wiederholen. Rushworth et al. (2003) beschreiben, dass der linke Lobus parietalis an der Vorbereitung und Neuausrichtung von Bewegungen und an der neuronalen Repräsentation einer Bewegungsabsicht beteiligt ist. Hierbei ist es die Aufgabe des LPI, die Aufmerksamkeit auf die Planung/Neuplanung einer Bewegung auszurichten. Rushworth et al. (2003) definieren solche Aufmerksamkeitsprozesse, die mit Arm und Handbewegungen einhergehen, als motorische Aufmerksamkeit (*motor attention*). Diese motorische Aufmerksamkeit wird vor allem mit der Aktivität im linken parietalen Kortex in Verbindung gebracht, auch dann, wenn Bewegungen der ipsilateralen linken Hand vorbereitet werden (Rushworth et al., 2003).

Für die im vorliegenden Experiment beobachtete Aktivität lässt sich daher schlussfolgern, dass verzögerte Rückmeldungen motorische Planungsprozesse zur Wiederholung der Eingabe evozieren. Innerhalb des fMRT-Experiments konnten jedoch kaum Wiederholungen der Tasteneingabe beobachtet werden. Eine Ursache hierfür liegt in der relativ kurzen Verzögerungsdauer. Im nachfolgenden Verhaltensexperiment (Studie IV, Kapitel 6) mit längeren Verzögerungen von bis zu 2 s konnten vermehrt Wiederholungen der Tasteneingabe durch die Probanden beobachtet werden. Je länger die Verzögerung andauerte, desto häufiger wurde die Eingabe wiederholt. Dieser Befund steht im Einklang mit der hier diskutierten Aktivität des LPI und wird in Abschnitt 6.5 ausführlich erörtert.

Gyrus cinguli anterior und posterior

Im anterioren und posterioren Anteil des Gyrus cinguli der jungen Probanden kommt es während aller Experimentalbedingungen zu einer Deaktivierung relativ zur Baseline. Verzögerungen der Systemantwort von 600 ms führen in der Gruppe der jungen Probanden zu einer signifikant stärkeren Deaktivierung im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Der ACC und der PCC sind damit die einzigen Regionen, in denen verzögerte Rückmeldungen einen Einfluss auf die neuronale Aktivität der jungen Probanden, nicht jedoch bei älteren Probanden ausüben.

Negative Rückmeldungen verstärken die Deaktivierung der BOLD-Antwort in beiden Altersgruppen. Dennoch ist auch diese Deaktivierung in der Gruppe der jungen Probanden signifikant stärker als bei älteren Probanden. Dies deutet darauf hin, dass die neuronale Aktivität dieser Hirnregionen bei älteren Probanden geringer ausgeprägt ist als bei jungen Probanden. In Positronen-Emissions-Tomographie (PET)-Studien konnten sowohl Moeller et al. (1996) als auch Garraux et al. (1999) nachweisen, dass es im (gesunden) alternden Gehirn zu einem frontalen Hypometabolismus kommt. Dieser frontale Hypometabolismus ist möglicherweise auf die Abnahme der synaptischen Dichte im Alter innerhalb dieser Hirnregion zurückzuführen (Huttenlocher, 1979). Andere Studien konnten zeigen, dass es auch im PCC zu einer Abnahme der Aktivität im Alter, vor allem während früher Phasen der Alzheimer-Krankheit kommt (Hirono et al., 1998; Minoshima et al., 1997).

Die Deaktivierung relativ zur Baseline ist typisch für die Region des ACC und tritt immer dann auf, wenn die Aufmerksamkeit des Probanden von inneren Prozessen auf externe Aufgaben gelenkt wird (McKiernan et al., 2003, 2006; Raichle et al., 2001). Ohne jegliche externe Aufgabenstellung - im sogenannten *default mode* (siehe Seite 46) - steigt die Signalintensität der Region dagegen an. Die Deaktivierung von der Baseline ist unabhängig von der Aufgabenstellung und ist umso stärker, je höher die kognitive Beanspruchung durch die externe Aufgabe ist (McKiernan et al., 2003). Dosenbach et al. (2006) zeigen, dass die Deaktivierung des ACC von der Dauer der externen Aufgabe abhängt (Dosenbach et al., 2006). Raichle et al. (2001) beschreiben zusätzlich eine Deaktivierung des PCC, wie sie auch in der vorliegenden Studie zu finden ist. Sie postulieren, dass ohne eine externe Aufgabe der PCC als eine tonisch aktive Region angesehen werden kann, die unablässig Informationen über die äußere Welt und innere Prozesse sammelt. Wird dagegen die Aufmerksamkeit auf einen Fokus gelenkt, beispielsweise wenn neue Stimuli verarbeitet werden müssen, wird die Aktivität im ACC und PCC abgeschwächt. Diese Abnahme der Aktivität spiegelt eine nötige Fokussierung der Ressourcen während der allgemeinen Informationsverarbeitung und -bewertung wider (Raichle et al., 2001).

Mit der Deaktivierung des ACC geht nach Dosenbach et al. (2006) eine Aktivierung des pMFC und der aI einher. Vermutlich gehören alle drei Regionen einem neuronalen Netzwerk der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle an und ermöglichen in ihrem Zusammenspiel die Aufmerksamkeit zielführend auszurichten. Im vorliegenden Experiment lenken verzögerte

4.2 fMRT-Studie zu verzögerten Rückmeldungen

Systemantworten mehr Aufmerksamkeit auf die Systemrückmeldung, da Probanden während dieser Zeitspanne im Unklaren darüber sind, ob ihre Eingabe vom System registriert wurde. Die dadurch ausgelösten Prozesse der Aufmerksamkeitsverschiebung und Handlungsplanung benötigen möglicherweise mehr kognitive Ressourcen als im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen, da der Organismus versucht, sein Verhalten auf solch unerwartete Ereignisse anzupassen (vgl. Orientierungsreaktion, Seite 19). Vermutlich spiegeln die erhöhte Deaktivierung im ACC und die erhöhte Aktivität im mPFC und der aI während verzögerter Systemantworten diesen erhöhten Bedarf an kognitiven Ressourcen wider.

Anders als bei jungen Probanden führen Verzögerungen zu keiner verstärkten Deaktivierung im ACC älterer Probanden. Dieser Unterschied ist nicht nur auf den bereits erwähnten frontalen Hypometabolismus im Alter zurückzuführen (Garraux et al., 1999; Moeller et al., 1996), sondern möglicherweise auch darauf, dass ältere Probanden die Verzögerungen während des Experiments im Durchschnitt weniger bewusst wahrgenommen haben. Die Verhaltensdaten zeigen, dass mehr ältere als jüngere Probanden angaben, die Verzögerungen während des Experiments nicht bemerkt zu haben. Zudem liegt die mittlere Schwelle zur Wahrnehmung einer Verzögerung für ältere Probanden mit rund 440 ms deutlich über der Wahrnehmungsschwelle der jüngeren Probanden mit rund 330 ms. Ausgehend von diesen Werten kann angenommen werden, dass ältere Probanden nur Verzögerungen von 600 ms bewusst wahrgenommen haben. Eine Ursache für die unterschiedliche Wahrnehmungsschwelle scheint zu sein, dass ältere Probanden größere Schwierigkeiten beim Lösen der auditorischen Kategorisierungsaufgabe haben. Sie machten signifikant mehr Fehler als junge Probanden. Möglicherweise waren sie stärker in das Lösen der Kategorisierungsaufgabe involviert als junge Probanden und hatten nicht genügend Aufmerksamkeitsressourcen zur Verfügung, um die Verzögerungen wahrzunehmen. In einer Meta-Analyse zur selektiven und geteilten Aufmerksamkeit im Alter konnten Verhaeghen & Cerella (2002) zeigen, dass die Leistung älterer Probanden in Aufgaben, die geteilte Aufmerksamkeit erfordern, abnimmt. Defizite für die selektive Aufmerksamkeit im Alter stellten sie nicht fest (Verhaeghen & Cerella, 2002). Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass das Fehlen der Deaktivierung während sofortiger und verzögerter Rückmeldungen in der Gruppe der älteren Probanden auf einen stärkeren frontalen Hypometabolismus im Alter zurückzuführen ist, der mit einer Abnahme der Leistung in Aufgaben einhergeht, die geteilte Aufmerksamkeit erfordern.

5 Studie III: Kontrollexperimente zum Einfluss der Nutzererwartung

5.1 Einleitung

Studie III beinhaltet zwei fMRT-Experimente, die als Kontrollexperimente der vorherigen Studie II dienen und die Erwartungshaltung der Probanden über den zeitlichen Verlauf der Interaktion mit dem System modulieren. Im fMRT-Experiment der Studie II traten nur wenige, für die Probanden unerwartete verzögerte Systemantworten auf. In den beiden nun vorliegenden Kontrollexperimenten wurde die Hälfte aller Systemrückmeldungen mit einer durchschnittlichen Verzögerung von 500 ms präsentiert. Mit dem Kontrollexperiment 1 soll gezeigt werden, dass häufig auftretende Verzögerungen nur zu Beginn einen Anstieg der Aktivität im neuronalen Netzwerk der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle hervorrufen. Sobald der Nutzer die regelmäßigen Verzögerungen in der Interaktion erwartet, sollte der Einfluss der Verzögerungen auf die Aktivität des in Studie II identifizierten Netzwerks abnehmen. Entsprechend den Annahmen von Shneiderman & Plaisant (2005) ist der Nutzer in der Lage, sein Verhalten an verzögerte Systemantworten anzupassen. Auch aus der Theorie von Mandler (1964) lässt sich schlussfolgern, dass nur unerwartete Verzögerungen zu einer Unterbrechung eines Handlungsablaufs führen, während erwartete Verzögerungen in der Handlungssequenz des Organismus berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 1.3.1). Diese Verhaltensbeobachtungen legen nahe, dass regelmäßig auftretende Verzögerungen keine zusätzlichen neuronalen Ressourcen benötigen, da sie vom Nutzer erwartet werden.

Im zweiten Kontrollexperiment wurden zusätzlich zu den regelmäßig verzögerten Systemantworten einzelne Durchgänge (10 %) präsentiert, in denen die Rückmeldung des Systems ganz ausblieb. Diese zusätzliche Experimentalbedingung wurde in Anlehnung an das Studiendesign von Kohrs et al. (2012) in das zweite Kontrollexperiment aufgenommen. Das zweite Kontrollexperiment hatte zum Ziel, den negativen Einfluss ausbleibender Rückmeldungen auf die Vertrauenswürdigkeit eines Systems zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass ausbleibende Rückmeldungen den Effekt verzögerter Systemantworten auf die neuronale Aktivität verstärken. Treten in einer Interaktion mit einem technischen System nicht nur Verzögerungen der Systemantwort auf, sondern bleibt die Antwort des Systems unerwartet aus, so steigt auf Sei-

ten des Nutzers die Unsicherheit über den zeitlichen Verlauf der Interaktion an. In einer solchen Situation kann der Nutzer während einer Verzögerung nicht wissen, ob die Rückmeldung noch erfolgt oder ausbleibt. Die Ergebnisse von Kohrs et al. (2012) zeigen, dass unerwartet verzögerte Rückmeldungen von 500 ms den gleichen Effekt ausüben wie das Ausbleiben einer Rückmeldung. Beide Bedingungen unterscheiden sich im identifizierten Netzwerk aus aI und pMFC nicht voneinander. Aus den Ergebnissen von Kohrs et al. (2012) geht nicht hervor, welchen Einfluss das Ausbleiben von Systemantworten auf die Verzögerungen hat und wie stark die Aktivität während einer Verzögerung von der Unerwartetheit dieses Ereignisses moduliert wird. Im zweiten Kontrollexperiment treten die Verzögerungen der Systemantwort genauso häufig auf wie sofortige Systemantworten. Ein Anstieg der neuronalen Aktivität während verzögerter Rückmeldungen sollte somit nicht auf die Unerwartetheit zurückzuführen sein, sondern nur den negativen Einfluss einzelner ausbleibender Rückmeldungen auf die Interaktion widerspiegeln.

Die Kontrollexperimente sollen zeigen, dass die neuronale Reaktion auf verzögerte Systemantworten von der Erwartung des Nutzers moduliert wird. Die Nutzererwartung ist hierbei abhängig von der Interaktionshistorie mit dem System und kann sowohl durch die Auftretenswahrscheinlichkeit verzögerter Systemantworten (Kontrollexperiment 1) als auch durch die Vertrauenswürdigkeit in das System (Kontrollexperiment 2) beeinflusst werden.

5.2 Hypothesen

Folgende Hypothesen werden für die beiden Kontrollexperimente aufgestellt:

- (a) Die neuronale Aktivität während verzögerter Systemantworten mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 50 % unterscheidet sich nur zu Beginn des Experiments von der neuronalen Aktivität während sofortiger Rückmeldungen.
- (b) Ausbleibende Rückmeldungen erhöhen die Aktivität im Netzwerk aus aI und pMFC.
- (c) Kommt es zum unerwarteten Ausbleiben von Rückmeldungen, führen auch erwartete verzögerte Systemantworten zu einer verstärkten Aktivität im Netzwerk aus aI und pMFC.

5.3 Material und Methode

5.3.1 Probanden

Am Kontrollexperiment 1 nahmen 20 Probanden teil, wobei ein Teilnehmer aufgrund von Bewegungsartefakten von der weiteren Analyse ausgeschlossen wurde (siehe Abschnitt 2.3). Das Durchschnittsalter der verbliebenen 19 Probanden (7 weiblich, 12 männlich) betrug zum Zeitpunkt der Messung $26,3 \pm 3,5$ Jahre.

5.3 Material und Methode

Am Kontrollexperiment 2 nahmen 22 Probanden teil. Fünf Probanden wurden aufgrund von Bewegungsartefakten von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Das Durchschnittsalter der übrigen 17 Teilnehmer (9 weiblich, 8 männlich) betrug $27,2 \pm 3,8$ Jahre.

5.3.2 Stimuli und Aufgabe

Die Probanden der Kontrollexperimente hatten, wie in den Experimenten zuvor, die Aufgabe FM-Töne entsprechend ihrer Modulationsrichtung per Tastendruck zu kategorisieren (siehe Abschnitt 2.7). Die präsentierten FM-Stimuli wurden mit einem Faktor von $k = 2$ moduliert. Aufgrund der deutlichen Modulation und einer Präsentationsdauer von 600 ms sind die FM-Stimuli für die Probanden einfach zu kategorisieren. Die visuelle Rückmeldung erfolgte unabhängig von der Korrektheit der Antwort und signalisierte den Probanden mittels eines grünen Häkchens nur, dass ihre Eingabe vom System registriert wurde. Antworteten die Probanden zu langsam wurde ein rotes Kreuz präsentiert. Diese Durchgänge wurden von der späteren Analyse ausgeschlossen. Dieses Stimulusdesign entspricht der Studie von Kohrs et al. (2012). Anders als in dieser früheren Studie wurden hier in 50 % aller Durchgänge die Rückmeldung mit einer Verzögerung von im Mittel 500 ms (300-700 ms) dargeboten. Im Kontrollexperiment 2 traten sofortige und verzögerte Rückmeldungen ebenfalls gleich häufig auf (je 45 %). Zudem blieb in 10 % aller Durchgänge die Rückmeldung des Systems ganz aus.

5.3.3 Datenerhebung

Die Erhebung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Die Dauer der funktionellen Messung beider Kontrollexperimente betrug je 28 min 6 s. Pro Experiment wurden 843 Volumen aufgenommen.

5.3.4 Datenvorverarbeitung fMRT

Die Datenvorverarbeitung der fMRT-Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

5.3.5 Datenanalyse fMRT

Die Analyse der funktionellen Daten erfolgte mit BrainVoyager QX Version 1.10.4 (Brain Innovation, Maastricht, Niederlande). Für beide Kontrollexperimente wurde aus der zeitlichen Abfolge der Experimentalbedingungen und aus den aufgezeichneten Verhaltensdaten je ein Protokoll erstellt und an die individuelle Leistung der Probanden angepasst. Durchgänge, in denen die Probanden nicht oder zu langsam ($>1,5$ s) geantwortet haben, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Eine Einteilung entsprechend der Korrektheit der Antwort der Probanden wurde

nicht vorgenommen, da die registrierenden Rückmeldungen den Probanden keine Informationen über die Korrektheit ihrer Eingabe vermittelten. Das Kontrollexperiment 1 bestand aus nur zwei Experimentalbedingungen: sofortige Rückmeldungen und verzögerte Rückmeldungen. Das Kontrollexperiment 2 bestand aus drei Experimentalbedingungen: sofortige Rückmeldungen, verzögerte Rückmeldungen und ausbleibende Rückmeldungen. Für jeden Probanden wurde eine Deconvolutions-Analyse berechnet. Das Vorgehen ist in Abschnitt 2.4 beschrieben. Die resultierenden Datensätze der einzelnen Probanden mit den individuellen statistischen Karten über die geschätzten Effekte (β -Werte) wurden für die weitere statistische Analyse zusammengeführt und mittels eines RFX-GLMs ausgewertet.

Für das Kontrollexperiment 1 wurde mittels RFX-Analyse der Kontrast zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen berechnet. Auf die resultierende statistische Karte wurden die in Studie II berechneten ROI der linken und rechten aI, des pMFC, des linken LPI und des rechten GFI gelegt (siehe Tabelle 4.6, Seite 63) und pro ROI ein GLM berechnet. Ausgehend von Hypothese (a) wurde hierfür das zugrunde liegende Protokoll in vier Zeitfenster eingeteilt und der Kontrast zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen pro Zeitfenster analysiert.

Auch im Kontrollexperiment 2 wurde, basierend auf den fünf ROIs (linke und rechte aI, pMFC, linker LPI, rechter GFI) aus Studie II, im ROI-GLM der Kontrast zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen pro Zeitfenster berechnet. Ausgehend von den Hypothesen (b) und (c) wurde zudem über das gesamte Kontrollexperiment 2 der Kontrast zwischen ausbleibenden und sofortigen Rückmeldungen und zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen sowie der Kontrast zwischen ausbleibenden und verzögerten Rückmeldungen analysiert.

5.4 Ergebnisse

Verhaltensdaten

Die Nachbefragung der Probanden (siehe Anhang A.3 und A.4, Seite 108 ff.) ergab, dass im ersten Kontrollexperiment 40% der Probanden und im zweiten Kontrollexperiment 30% der Probanden die Verzögerung der Systemantworten nicht wahrgenommen haben. Neun der 17 Probanden aus Kontrollexperiment 2 gaben zudem an, dass sie während des Experiments nicht bemerkt haben, dass das Ausbleiben der Rückmeldung Teil des Experiments ist. Zwölf der Probanden berichten, dass sie durch das Ausbleiben der Rückmeldung irritiert waren und verunsichert wurden.

fMRT

Über die Dauer des gesamten Kontrollperiments 1 hinweg ergab der direkte Vergleich zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen keinen signifikanten Unterschied zwischen

5.4 Ergebnisse

beiden Bedingungen ($FDR > 0,1$). Aus diesem Grund wurden die ROIs der fünf größten Regionen aus Studie II auf die statistische Karte gelegt und der Kontrast zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen im Verlauf des Kontrollexperimentes innerhalb von vier Zeitfenstern verglichen. Die statistischen Werte sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Im ersten Viertel führen im pMFC, der linken aI und dem LPI verzögerte Rückmeldungen zu einer signifikant stärkeren Aktivität als sofortige Rückmeldungen. Im zweiten und dritten Viertel liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Im letzten Viertel finden sich signifikante Unterschiede zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen im pMFC und der linken anterioren Insel. Diese fallen jedoch kleiner aus als im ersten Viertel. Im LPI, der im ersten Viertel den größten Unterschied zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen aufweist, zeigt sich im letzten Viertel des Experiments kein Unterschied zwischen den beiden Bedingungen. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft den BOLD-Verlauf im LPI, pMFC und der linken aI während des ersten und des letzten Viertels. Im ROI der rechten aI und im GFI liegen im Kontrollexperiment 1 in keinem Zeitfenster signifikante Aktivitätsunterschiede zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen vor.

Tabelle 5.1: ROI-Analyse der Regionen mit stärkerer Aktivität während verzögerter Rückmeldungen im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen im Kontrollexperiment 1 ohne ausbleibende Rückmeldungen und im Kontrollexperiment 2 mit ausbleibenden Rückmeldungen.

Regionen	1. Viertel		2. Viertel		3. Viertel		4. Viertel	
	t	p	t	p	t	p	t	p
Kontrollexperiment 1								
Gyrus frontalis medialis posterior	2,64	0,02	0,31	0,76	0,94	0,36	2,57	0,02
linke anteriore Insula	2,74	0,01	0,30	0,76	1,36	0,19	2,14	0,05
rechte anterior Insula	1,71	0,10	-0,51	0,62	1,03	0,32	2,09	0,06
Gyrus frontalis inferior	1,28	0,21	0,05	0,96	1,96	0,07	1,65	0,11
Lobus parietalis inferior	4,39	0,00	1,68	0,11	0,373	0,58	0,56	0,58
Kontrollexperiment 2								
Regionen								
Gyrus frontalis medialis posterior	3,41	0,00	1,26	0,22	2,96	0,01	2,51	0,02
linke anteriore Insula	2,63	0,02	1,24	0,23	3,76	0,00	3,10	0,01
rechte anterior Insula	3,94	0,00	1,22	0,24	3,99	0,00	2,71	0,02
Gyrus frontalis inferior	4,87	0,00	-0,59	0,56	2,55	0,02	2,70	0,02
Lobus parietalis inferior	4,28	0,00	1,43	0,17	2,51	0,02	2,44	0,02

5.4 Ergebnisse

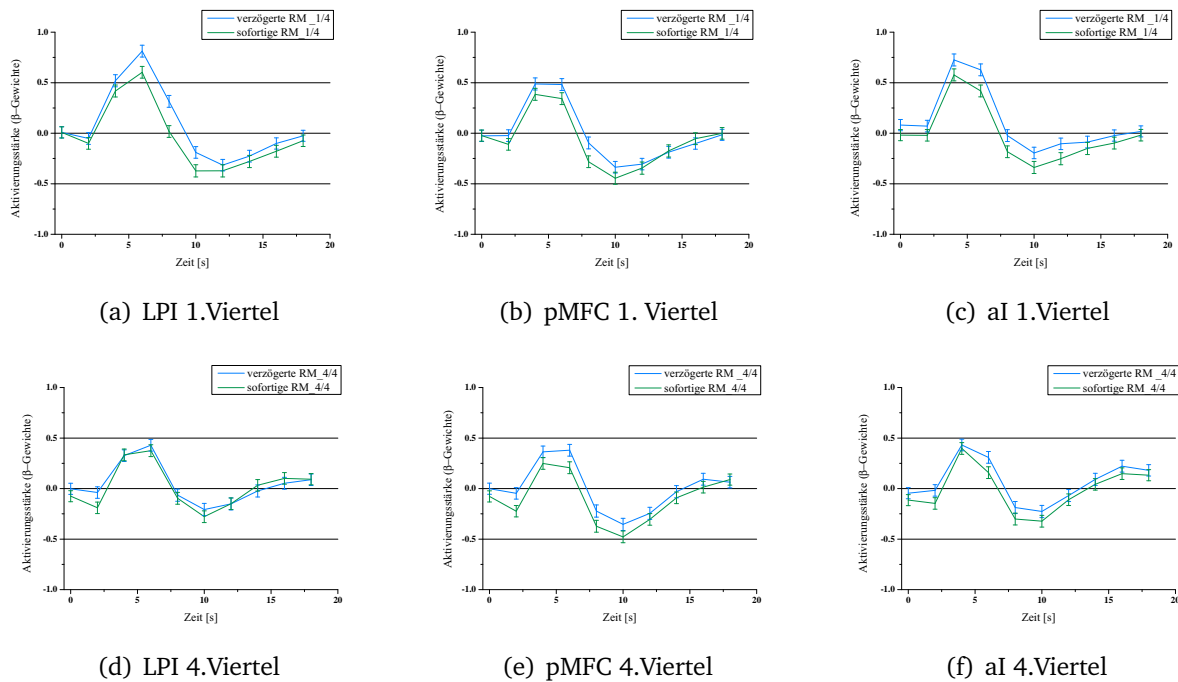


Abbildung 5.1: Kontrollexperiment 1: Stärkere Aktivierung des linken LPI, des pMFC und der linken aI während verzögerter Rückmeldungen im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen im ersten Viertel der Messung (a), (b) und (c). Im 4.Viertel ist der Unterschied zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen im pMFC (e) und in der aI (f) kleiner als zu Beginn der Messung. Im LPI liegt im letzten Viertel (d) kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen vor. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

Tabelle 5.2: Kontrollexperiment 2: ROI - Glm - Analyse der Netzwerkregionen. Alle Regionen zeigen einen signifikanten Aktivitätsunterschied zwischen den drei Bedingungen verzögerte Rückmeldungen, sofortige Rückmeldungen und ausbleibende Rückmeldungen. Eine Ausnahme bildet der LPI, der keinen signifikanten Unterschied zwischen verzögerten und ausbleibenden Rückmeldungen aufweist.

Region	verzögert vs sofort		ausbleibend vs sofort		ausbleibend vs verzögert	
	t	p	t	p	t	p
Gyrus frontalis medialis posterior	5,28	0,00	6,70	0,00	4,99	0,00
linke anteriore Insula	4,79	0,00	6,66	0,00	5,56	0,00
rechte anterior Insula	5,37	0,00	7,57	0,00	6,13	0,00
Gyrus frontalis inferior	4,35	0,00	4,46	0,00	2,74	0,01
Lobus parietalis inferior	4,96	0,00	4,28	0,00	1,96	0,07

5.5 Diskussion

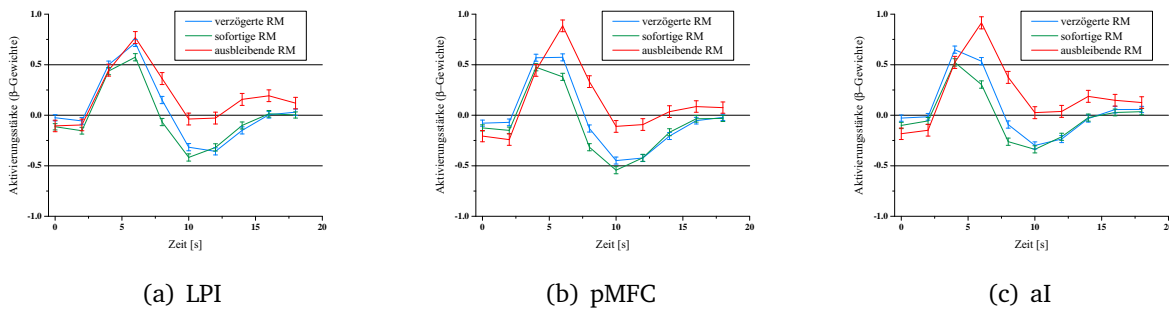


Abbildung 5.2: *Kontrollexperiment 2: Durchgänge mit ausbleibenden Rückmeldungen (rot) weisen eine erhöhte Aktivität im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen (grün) auf. Auch während verzögerter Rückmeldungen ist im Verlauf des gesamten Experiments die Aktivität im linken LPI (a) und in der linken anterioren Insel (c) signifikant erhöht. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.*

Die im Kontrollexperiment 2 eingebauten Durchgänge mit ausbleibenden Rückmeldungen führten im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen zu einer signifikant erhöhten Aktivität in den fünf ROIs (linke und rechte aI, pMFC, linker LPI, rechter GFI). Wie in der Abbildung 5.2 anhand des BOLD-Verlaufs von LPI, pMFC und der aI beispielhaft verdeutlicht wird, führen neben den ausbleibenden Rückmeldungen auch verzögerte Rückmeldungen zu einer signifikant erhöhten Aktivität (siehe Tabelle 5.2). Anders als im Kontrollexperiment 1 ist der berechnete Kontrast zwischen verzögerten Rückmeldungen und sofortigen Rückmeldungen in allen fünf ROIs sowohl im ersten Viertel als auch im letzten Viertel des Kontrollexperiment 2 signifikant (siehe Tabelle 5.1). Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass während des zweiten Viertels keine signifikanten Unterschiede vorliegen.

5.5 Diskussion

Sind Verzögerungen ein regelmäßiger Bestandteil einer Interaktion, wie im ersten Kontrollexperiment, so lösen die Verzögerungen vor allem zu Beginn der Interaktion einen signifikanten hämodynamischen Aktivitätsanstieg aus. Drei Areale des in Studie II definierten neuronalen Netzwerks (linke aI, pMFC und linker LPI) weisen eine erhöhte Aktivität im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen auf. Dieser Aktivitätsunterschied nimmt jedoch im Verlauf des ersten Kontrollexperiment ab. Vor allem der LPI weist im letzten Viertel des Kontrollexperiment 1 keinen Unterschied mehr zwischen verzögerten und sofortigen Rückmeldungen auf. Zwei Areale des Netzwerks, die rechte aI und der rechte GFI, weisen zudem zu keinem Zeitpunkt der Interaktion einen signifikanten Unterschied auf. Die Auftretenswahrscheinlichkeit der Verzögerung von 50 % hat dazu geführt, dass die Probanden im Verlauf des Experiments eine Erwartungshaltung gegenüber den verzögerten Rückmeldungen aufbauen konnten. Die ermittelte neuronale Aktivität ist konsistent zu den Beobachtungen von Shneiderman & Plaisant (2005), wonach Nutzer

technischer Systeme in der Lage sind, ihr Verhalten an regelmäßig verzögerte Antworten des Systems anzupassen. Möglicherweise lässt sich dieses Ergebnis auch mit dem psychophysiologischen Effekt des *intentional binding* erklären (Haggard et al., 2002). Danach zeigen verschiedene psychophysiologische Studien, in denen Probanden nach einer taktilen Eingabe verzögerte Rückmeldungen erhielten, dass es nach einer Anpassungsphase zu einer zeitlichen Rekalibrierung der Wahrnehmung kommt, die dazu führt, dass Verzögerungen der Rückmeldung nicht mehr wahrgenommen werden. Zusätzlich zeigten diese Studien, dass nach einer Kalibrierung die sofortigen Rückmeldungen als zeitlich vor der taktilen Eingabe wahrgenommen werden (Haggard et al., 2002; Heron et al., 2009; Keetels & Vroomen, 2012). Da im vorliegenden Experiment aber nur 50 % der Rückmeldungen verzögert dargeboten wurden, kann ein solcher Effekt ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse aus Kontrollexperiment 1 lassen vermuten, dass der Einfluss erwarteter Verzögerungen auf die neuronale Aktivität im Verlauf der Interaktion abnimmt. Da der Nutzer die Verzögerung erwartet, sind keine zusätzlichen kognitiven Ressourcen nötig, um sein weiteres Verhalten an die Verzögerungen anzupassen. Unerwartete Verzögerungen wie im fMRT-Experiment der Studie II führen dagegen im gesamten Verlauf der Interaktion zu einem Anstieg der neuronalen Aktivität. Erst durch die zeitliche Unerwartetheit eines Ereignisses wird ein Anstieg der neuronalen Aktivität hervorgerufen. Dies steht im Einklang mit Studien von Brown & Braver (2005), Forster & Brown (2011), Jessup et al. (2010) und Limongi et al. (2013), die einen Anstieg der Aktivität im pMFC in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses fanden.

Im zweiten Kontrollexperiment führen Verzögerungen der Systemantwort zu einem signifikanten Aktivitätsanstieg im neuronalen Netzwerk aus aI, pMFC, GFI und LPI. Anders als im ersten Kontrollexperiment zeigt sich, dass auch noch im letzten Viertel die Aktivität während verzögerter Rückmeldungen im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen in allen fünf Regionen signifikant erhöht ist. Allerdings finden sich im Zeitfenster des zweiten Viertels keine signifikanten Unterschiede. Möglicherweise ist die Einteilung in vier Zeitfenster kritisch zu beurteilen, da die statistische Analyse nur wenige Trials pro Bedingung und pro Zeitfenster ($n = 20$) umfasst. Das Ergebnis legt jedoch nahe, dass die Hypothese (c) bestätigt werden kann, wonach in einer unsicheren Interaktion, in der Rückmeldungen ausbleiben, auch Verzögerungen der Systemantwort an Bedeutung gewinnen und dauerhaft die neuronale Aktivität beeinflussen. Sehr wahrscheinlich wird die Bedeutung der Verzögerungen für den Nutzer durch das unerwartete Ausbleiben der Systemantwort moduliert, da das Ausbleiben die Vertrauenswürdigkeit in das System herabsetzt. Während der Dauer der Verzögerung bleibt der Nutzer im Unklaren darüber, ob seine Eingabe vom System registriert wurde und er eine Rückmeldung vom System erhält oder die Antwort des Systems erneut ausbleibt.

Die Ergebnisse des Kontrollexperiment 2 bestätigen ebenfalls die Hypothese (b). Das Ausbleiben der Systemantwort führt in den Hirnregionen des in Studie II ermittelten Netzwerks zu einer signifikant stärkeren Aktivität im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen, aber auch im Vergleich zu verzögerten Rückmeldungen. Nur im linken LPI ist der Unterschied zwischen verzögerten und ausbleibenden Rückmeldungen nicht signifikant (vgl. Abschnitt 4.2.9.2, Seite 75). In den vier anderen ROIs (linke und rechte aI, pMFC und GFI) erhöht das Ausbleiben der Rückmeldungen die BOLD-Antwort signifikant gegenüber verzögerten Rückmeldungen. In einer vorhergehenden Studie mit unerwarteten Verzögerungen lag kein signifikanter Unterschied zwischen verzögerten und ausbleibenden Rückmeldungen vor (Kohrs et al., 2012). Beide Bedingungen führten zu einem ähnlich starken Anstieg der Aktivität im Vergleich zu sofortigen Rückmeldungen. Anders als im vorliegenden Experiment erfolgte die Präsentation der beiden Bedingungen für die Probanden unerwartet. Die Auftretenswahrscheinlichkeit beider Bedingungen lag bei 15 % (Kohrs et al., 2012). Im Kontrollexperiment 2 wurden Verzögerungen der Systemantwort dagegen mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 45 % präsentiert. Wie das Kontrollexperiment 1 gezeigt hat, führen diese relativ häufig auftretenden Verzögerungen zu keinem dauerhaft messbaren Anstieg der neuronalen Aktivität. Es ist deshalb davon auszugehen, dass im zweiten Kontrollexperiment der Anstieg der neuronalen Aktivität während verzögerter Systemrückmeldungen durch den negativen Einfluss einzelner ausbleibender Rückmeldungen auf die Interaktion hervorgerufen wird.

Aus den beiden Kontrollexperimenten lässt sich somit schlussfolgern, dass die Unerwartetheit einer Verzögerung und die Vertrauenswürdigkeit in das System die neuronale Antwort modulieren.

6 Studie IV: Tastendruckdynamik während verzögerter Rückmeldungen

6.1 Einleitung

Aus den Befunden der Studien II und III wird deutlich, dass unerwartet verzögerte Rückmeldungen Hirnareale der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle stärker aktivieren als sofortige Rückmeldungen. Dass ein solcher Anstieg der BOLD-Antwort womöglich auch mit einem veränderten Verhalten in der Tastendruckdynamik nach verzögerten Rückmeldungen einhergeht, sollte bereits im fMRT-Experiment der Studie II untersucht werden. Durch die schlechte Positionierung der Taster im MR-Scanner lieferte die Analyse jedoch keine statistisch signifikanten Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde das vorliegende Experiment außerhalb des MR-Scanners erhoben, um zu überprüfen, ob verzögerte Rückmeldungen zu Veränderungen im Tastendruckverhalten der Probanden führen.

Parameter wie die Dauer von Tastendrücken oder die Latenz zwischen Tastendrücken von Nutzern werden bereits heute analysiert und bspw. zur Individualisierung von Passwörtern eingesetzt (Joyce & Gupta, 1990; Karnan et al., 2011; Leberknight et al., 2008). Der individuelle Rhythmus beim Schreiben per Tastatur ist so einzigartig, dass er zur Identifikation genutzt werden kann. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Verbesserung der herkömmlichen Sicherheitsstandards bei der Verwendung von Passwörtern (für einen Überblick siehe Karnan et al. (2011)). Aber auch durch die Mittelung von Tasterdaten verschiedener Personen lassen sich Informationen gewinnen. So klassifizierten Epp et al. (2011) den emotionalen Zustand von Nutzern anhand der Dauer der Tastendrücke. Bisher liegt der Schwerpunkt der verschiedenen Studien auf der Analyse der Dauer der Tastendrücke und/oder der Latenz zwischen Tastendrücken. Nur wenige Studien haben bisher versucht, die Intensität der Tastendrücke zu analysieren (Leberknight et al., 2008). Die verschiedenen Arbeiten aus dem Bereich der Computer-Ergonomie lassen vermuten, dass das Andruckverhalten individuell sehr verschieden, aber durch äußere Faktoren beeinflussbar ist. Welche dieser Faktoren sich auf das Tastendruckverhalten auswirken, geht aus der bisher vorliegenden Literatur nicht hervor.

Dass Verzögerungen der Systemantworten einen Einfluss auf die Tastendruckdynamik haben könnten, lässt sich aus der Theorie von Mandler (1964) ableiten. Danach tendiert der Organismus während einer Verzögerung im Handlungsablauf dazu, die einmal ausgeführte Handlung solange und mit verstärkter Kraft zu wiederholen, bis der erwartete Effekt eintritt (siehe Abschnitt 1.3.1).

Das Ziel der Studie IV ist es, zu analysieren, ob und ab welcher Verzögerung die Probanden den Taster zur Eingabe ihrer Antwort wiederholt betätigen. Weiterhin soll geklärt werden, ob die wiederholten Tastendrucke mit stärkerer Intensität und erhöhter Dauer ausgeführt werden. Aber nicht nur wiederholte Tastendrucke fließen in die Analyse ein, sondern auch Tastendrucke der Trials, die verzögerten Systemantworten folgten. Es wird von Interesse sein, ob in diesen Trials ebenfalls ein Anstieg der Dauer und Intensität der Tastendruckdynamik zu beobachten ist.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit Studie II wurde eine minimale Verzögerungsdauer von 500 ms gewählt. Ob diese Verzögerung von 500 ms Auswirkungen auf das Verhalten der Probanden hat, ist unklar. Die in der Literatur verwendeten Verzögerungen der Systemantwort liegen weit über dem verwendeten Wert von 500 ms, denn in den 1970er und 1980er Jahren umfassten übliche SRZ ein Zeitfenster von 2 bis 30 Sekunden (Barber & Lucas, 1983; Kuhmann et al., 1987). Aus diesem Grund wurden zwei weitere Verzögerungen von 1 s und 2 s in das Studiendesign aufgenommen, um eine Brücke zur vorliegenden Literatur aus den 1980er Jahren zu schlagen. Gut vergleichbar sind die gewählten Verzögerungszeiten mit einer neueren Studie von Szameitat et al. (2009). Sie variierten in ihrem Experiment die Dauer der Verzögerung von 500 ms bis 2800 ms und untersuchten die Reaktionszeiten und die Fehlerraten während verzögerter Systemantworten im Vergleich zu sofortigen Systemantworten. Verzögerte Systemantworten führten zu einer Verdopplung der Fehlerrate und zu längeren Reaktionszeiten (Szameitat et al., 2009). Eine Zunahme der Nutzerantwortzeiten und der Fehlerrate mit längeren SRZ steht im Einklang mit den Befunden früherer Studien (Dabrowski & Munson, 2011; MacKenzie & Ware, 1993) (siehe Abschnitt 1.2.3).

In Studie IV sollten daher neben der Tastendruckdynamik auch die Reaktionszeiten nach den drei verzögerten Systemantworten von 500 ms, 1 s und 2 s untersucht werden. Szameitat et al. (2009) mittelten die verschiedenen SRZ (mittlere Verzögerung von 1,6 s). Das vorliegende Experiment soll klären, ob es mit Zunahme der SRZ zu einer Verstärkung des von Szameitat et al. (2009) beschriebenen Effekts auf die Reaktionszeiten in Trials nach verzögerten Rückmeldungen kommt.

Zur weiteren Analyse der Tastendruckdynamik soll anhand der Korrektheit der Nutzerangaben überprüft werden, ob neben den Verzögerungen der Systemantwort weitere Faktoren die Tastendruckdynamik beeinflussen. Verschiedene Studien zeigen, dass sich korrekte und inkorrekte Antworten in ihrer Reaktionszeit unterscheiden (Brown & Heathcote, 2008; Ratcliff &

Smith, 2004). Möglicherweise lassen sich korrekte und inkorrekte Antworten auch anhand der Tastendruckdynamik klassifizieren.

Neben den Tasterdaten wurden im Experiment IV der Hautleitwert und die Herzrate erhoben (Kohrs et al., 2014). Die Analyse dieser Daten ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit und wird nur in die Diskussion der Tasterdaten Eingang finden.

6.2 Hypothesen

Aus den Annahmen von Mandler (1964) und den Ergebnissen von Szameitat et al. (2009) lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

- (a) Verzögert sich die erwartete Rückmeldung, werden die Probanden ihre Antworteingabe per Tastendruck wiederholen.
- (b) Es wird erwartet, dass diese wiederholten Tastendrucke mit einer erhöhten Intensität (einer größeren Kraft) und längerer Dauer ausgeführt werden.
- (c) Die Probanden werden auch in Trials, welche verzögerten Rückmeldungen folgen, mit erhöhter Intensität und Dauer den Taster betätigen.
- (d) Die Reaktionszeit nach Trials mit verzögerten Rückmeldungen verlängert sich im Vergleich zur Reaktionszeit nach Trials mit sofortigen Rückmeldungen.
- (e) Es wird erwartet, dass sich korrekte Eingaben von inkorrekten Eingaben anhand der Tastendruckdynamik und anhand der Reaktionszeiten unterscheiden lassen. Korrekte Antworten sollten schneller und mit mehr Kraft und längerer Dauer ausgeführt werden als inkorrekte Eingaben der Probanden.

6.3 Material und Methode

6.3.1 Probanden

Am Experiment nahmen 23 Probanden (10 weiblich, 13 männlich) teil. Das Durchschnittsalter lag bei $25,8 \pm 2,9$ Jahren.

6.3.2 Stimuli und Aufgabe

Für das vorliegende Experiment wurden die gleichen FM-Töne verwendet wie in Studie II, mit den drei Schwierigkeitsgraden leicht, mittelschwer und schwer. Insgesamt lagen von jedem

6.3 Material und Methode

Schwierigkeitsgrad je 25 aufsteigende und 25 absteigende Stimuli vor. Die insgesamt 150 verschiedenen Stimuli wurden während des gesamten Experiments abhängig von der Reaktionszeit der Probanden bis zu zweimal wiederholt und in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten.

Während des Experiments deutete ein weißes Fixationskreuz auf hellgrauem Hintergrund die Präsentationsstelle der visuellen Rückmeldung an. Nach korrekten Antworten wurde ein grünes Häkchen, nach falschen Antworten ein rotes Kreuz präsentiert. Die visuellen Rückmeldungen wurden mit einer Dauer von 1000 ms dargeboten. Antworteten die Probanden nicht innerhalb von 1500 ms nach Stimulusbeginn, wurde ihnen nach weiteren 1000 ms ein rotes Kreuz präsentiert.

Im Experiment wurde in der oberen rechten Ecke des Bildschirms die noch zu absolvierende Anzahl an auditorischen Stimuli innerhalb des Blocks dargeboten. In der rechten unteren Ecke zählte ein Countdown von einer Minute in Ein-Sekunden-Schritten rückwärts. In den ersten 30 s waren die Zahlen des Counters neutral in weiß gehalten, nach 30 s wechselten sie von weiß nach rot, um den Zeitdruck zu erhöhen. Das Experiment bestand aus 20 Blöcken Stimuluspräsentation á einer Minute. Die FM-Töne wurden im pseudorandomisierten Inter-Trial Abstand von 2 s, 3 s oder 4 s dargeboten, so dass sich - abhängig von der Reaktionszeit des Probanden - ein Interstimulusintervall von durchschnittlich 3,5 s, 4,5 s und 5,5 s ergibt. Insgesamt konnten abhängig von der Reaktionszeit des Probanden innerhalb eines ein-minütigen Blocks bis zu 15 Töne absolviert werden. Nach jedem Block wurde dem Probanden für 5 s die erreichte Punktzahl präsentiert, gefolgt von einer Pause von 25 s. Vor Beginn jedes neuen Blocks wurde für 3 s der Counter angezeigt, bevor der erste FM-Ton präsentiert wurde und die Zeit abzulaufen begann. Als experimentelle Bedingungen wurden innerhalb von 15 Blöcken - je Block - pseudorandomisiert drei unterschiedlich lange Verzögerungen der Rückmeldung eingebaut. Die Dauer der Verzögerungen betrug 0,5 s, 1 s und 2 s. Die Verzögerungen traten innerhalb eines Blocks frühestens nach der dritten FM-Präsentation auf und nicht mehr innerhalb der letzten drei Stimulipräsentationen, da diese nicht immer von den Probanden erreicht werden konnten. Block 1, 4, 8, 14 und 17 enthielten keine Verzögerungen.

6.3.3 Datenerhebung der Tasterdaten

Das Experiment fand im Zentrallabor des Sonderforschungsbereichs/Transregio 62 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg statt. Während des Experiments saßen die Probanden im dafür eingerichteten Probandenraum, welcher vom Tageslicht abgedunkelt und durch LED-Lampen gleichmäßig ausgeleuchtet wurde. Die Probanden saßen auf einem bequemen Stuhl und wurden nach der Instruktion der Aufgabe und der Einstellung der Lautstärke der FM-Töne an die in diesem Experiment ebenfalls erhobenen physiologischen Messinstrumente angeschlossen. Die Präsentation der Stimuli erfolgte über Kopfhörer (Sennheiser HD408), die visuellen Informationen wurden über einen Bildschirm dargeboten. Der Taster zur Registrierung der Antwort

der Probanden ermöglicht die Auswertung der Tastendruckdynamik (COVILEX ® GmbH, Magdeburg, Deutschland)(siehe Abschnitt 2.5). Während die behavioralen Daten des Experiments durch das Programm Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, USA) in eine Logdatei gespeichert wurden, zeichnete die Software der Tasterbox die Tastendruckdynamik in eine binäre Logdatei auf. Das Experiment dauerte rund 32 Minuten. Die synchrone Aufnahme der physiologischen und behavioralen Daten wurde über einen Starttrigger unter Einbeziehung der ersten Antwort des Probanden als Referenzsignal ermöglicht. Die Datenaufnahme erfolgte über das Programm DAAQ (DataAcquisition, Meinecke A.).

6.3.4 Datenvorverarbeitung der Tasterdaten

Im Anschluss an die Messung wurden in einem nachfolgenden Schritt die verschiedenen Daten auf das Referenzsignal synchronisiert. Die beiden Logdateien wurden in eine gemeinsame csv-Datei überführt und in Excel (Microsoft ® Office Excel ® 2007) eingelesen.

6.3.5 Datenanalyse

Reaktionszeiten

Die Mittelwerte der einzelnen Probanden wurden zur statistischen Analyse in SPSS (PASW Statistics) eingelesen. Die Reaktionszeitdaten wurden auf Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test, Massey (1951)) überprüft. Für den ersten Analyseschritt erfolgte die Mittelung der Reaktionszeitdaten der Einzelprobanden nach korrekten und inkorrekten Antworten. Zur Überprüfung des statistischen Unterschieds wurde ein *t*-Test für verbundene Stichproben berechnet.

Weiterhin sollte überprüft werden, ob verzögerte Rückmeldungen zu verlängerten Reaktionszeiten im nachfolgenden Trial führen. Hierfür wurden die Reaktionszeiten aller korrekten sofortigen Rückmeldungen gemittelt, die einem Trial mit verzögerten Rückmeldungen folgten und in einer Varianzanalyse für Messwiederholung mit den Mittelwerten der Reaktionszeiten verglichen, die Trials mit sofortigen Rückmeldungen folgten.

Tasterdaten

Die Dauer und die Intensität der Tastendrucke wurde für die verschiedenen Experimentalbedingungen ausgewertet. Die Grundlage der Tastendruckintensität bildete der Maximalwert eines jeden Tastendrucks. Für jeden Probanden wurden die Mittelwerte der Intensität und der Dauer für korrekte und inkorrekte Antworten berechnet. Aus den korrekten Tastendrücken wurden zudem die Mittelwerte der Trials berechnet, die sofortigen Rückmeldungen folgten und die Mittelwerte der Trials, die verzögerten Rückmeldungen folgten.

Weiterhin wurde die Intensität und die Dauer der wiederholten Tastendrucke analysiert, die

während einer verzögerten Rückmeldung auftraten und mit dem jeweils ersten Tastendruck des Trials verglichen. Die Mittelwerte der einzelnen Probanden wurden zur statistischen Analyse in SPSS (PASW Statistics) eingelesen. Die Tasterdaten wurden auf Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test, Massey (1951)) getestet.

Für den Vergleich zwischen korrekten und inkorrekten Antworten wurde ein *t*-Test für verbundene Stichproben berechnet. Ebenso wurden *t*-Tests zum Mittelwertsvergleich zwischen dem ersten und dem wiederholten Tastendruck für die drei Verzögerungsbedingungen berechnet.

Für den Vergleich der Tastendruckdynamik in Trials nach verzögerten Rückmeldungen wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet. Der gewählte (einfache) Kontrast vergleicht jeweils die erste Faktorstufe (sofortige Rückmeldungen -d0) des vierstufigen Faktors *Verzögerung* (d0, d0.5, d1, d2) mit einer Faktorstufe der Verzögerungsbedingungen (d0.5, d1, d2).

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Reaktionszeiten

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten für korrekte und inkorrekte Antworten sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Der *t*-Test für verbundene Stichproben ergab einen signifikanten Unterschied in der Reaktionszeit zwischen korrekten und inkorrekten Antworten ($t = 2,49; p < 0,05$). Korrekte Antworten werden signifikant schneller ausgeführt als inkorrekte Antworten. Die durchschnittliche Fehlerrate aller Probanden lag bei 14,4% ($\pm 8,8\%$).

Zur Überprüfung der Hypothese (d), wonach die Reaktionszeiten in Trials nach verzögerten Rückmeldungen länger sind als in Trials nach sofortigen Rückmeldungen, wurde eine Varianzanalyse für Messwiederholungen berechnet. In die Analyse fließen nur die Werte korrekter Rückmeldungen ein. Die Mittelwerte der Reaktionszeiten nach den verschiedenen Verzögerungsbedingungen sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Der Unterschied in der Reaktionszeit zwischen den sofortigen Rückmeldungen, die auf Trials mit verzögerten Rückmeldungen folgten und denen, die sofortigen Rückmeldungen folgten, ist nicht signifikant ($F(3,66) = 0,81; p = 0,49$). Es liegt keine signifikante Veränderung der Reaktionszeit der Probanden nach verzögerten Rückmeldungen vor.

Tabelle 6.1: Mittelwerte der Reaktionszeiten, der Tastendruckdauer und der Tastendruckintensität (in arbitrary units = a.u.) korrekter und inkorrekt Antworten. Standardabweichungen (der Analyse) in Klammern.

	Reaktionszeit [ms]		Dauer [ms]		Intensität [a.u.]	
korrekt	621,9	(87,8)	163,0	(6,5)	72,8	(2,9)
inkorrekt	677,6	(173,5)	146,2	(6,8)	68,0	(2,9)

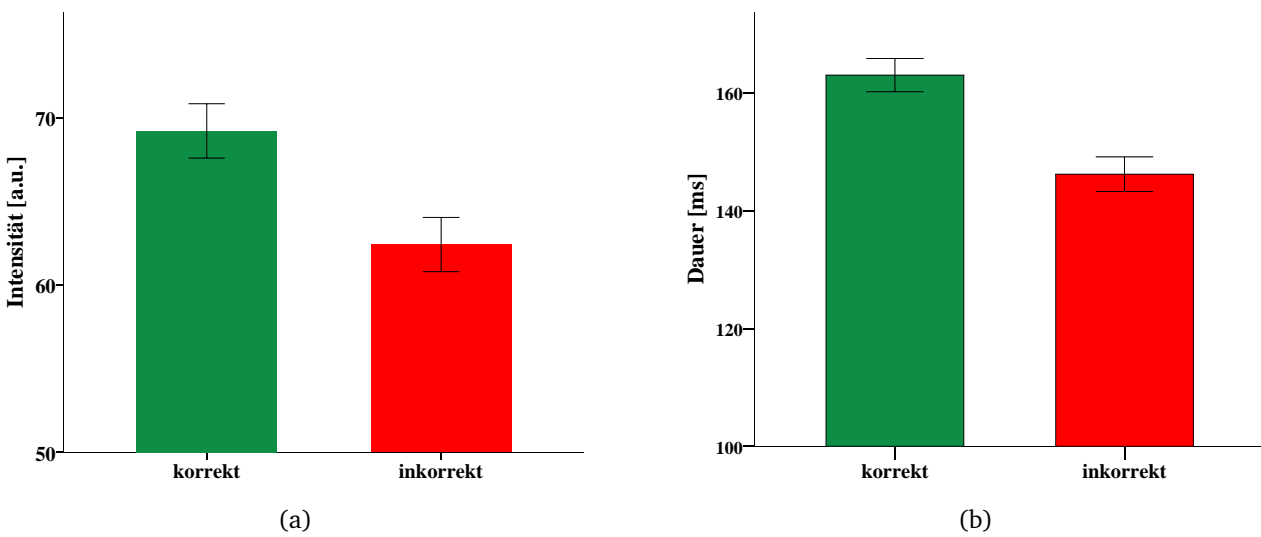


Abbildung 6.1: Signifikant stärkere Tastendruckintensität (a) (in arbitrary units = a.u.) und erhöhte Dauer (b) während korrekter Antworten (grün) verglichen mit inkorrekten Antworten (rot). Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

6.4.2 Tastendruckdynamik

Die Mittelwerte der Dauer und der Intensität für die korrekten und inkorrekten Eingaben der Probanden sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Der *t*-Test für verbundene Stichproben ergab einen signifikanten Unterschied sowohl für die Intensität ($t = 4,18; p < 0,01$) als auch für die Dauer ($t = 3,58; p < 0,01$) der korrekten und inkorrekten Tastendrucke. Wie der Abbildung 6.1 zu entnehmen ist, drücken die Probanden den Taster während korrekter Antworten signifikant länger und mit stärkerer Intensität als während inkorrekter Antworten.

Wie die Analyse zeigt, wiederholen 20 der 23 Probanden ihren Tastendruck, wenn Verzögerungen der Systemantwort auftreten. Insgesamt treten in 23,6% aller Durchgänge mit einer Verzögerung von 500 ms wiederholte Tastendrucke auf. Liegt die Dauer der Verzögerung bei 1 s kommt es bereits in 42,7% und bei einer Verzögerung von 2 s in 47,8% aller Durchgänge zur wiederholten Eingabe des Tastendrucks. Die drei Werte unterscheiden sich signifikant vonein-

Tabelle 6.2: Signifikante Unterschiede in der Intensität (in arbitrary units = a.u.) und der Dauer zwischen dem ersten Tastendruck (TD1) und dem wiederholten Tastendruck (TD2) für alle drei Verzögerungsbedingungen ($d_{0.5}$, d_1 , d_2).

	Intensität [a.u.]				Dauer [ms]			
	TD1 \bar{x}	TD2 \bar{x}	<i>t</i>	<i>p</i>	TD1 \bar{x}	TD2 \bar{x}	<i>t</i>	<i>p</i>
d 0.5 (n = 17)	54.21	71.13	-4.18	< .01	134.36	184.55	-4.60	< .01
d 1 (n = 20)	60.93	80.67	-3.45	< .01	138.67	186.74	-5.28	< .01
d 2 (n = 19)	63.97	78.36	-3.22	< .01	155.83	209.67	-4.46	< .01

6.4 Ergebnisse

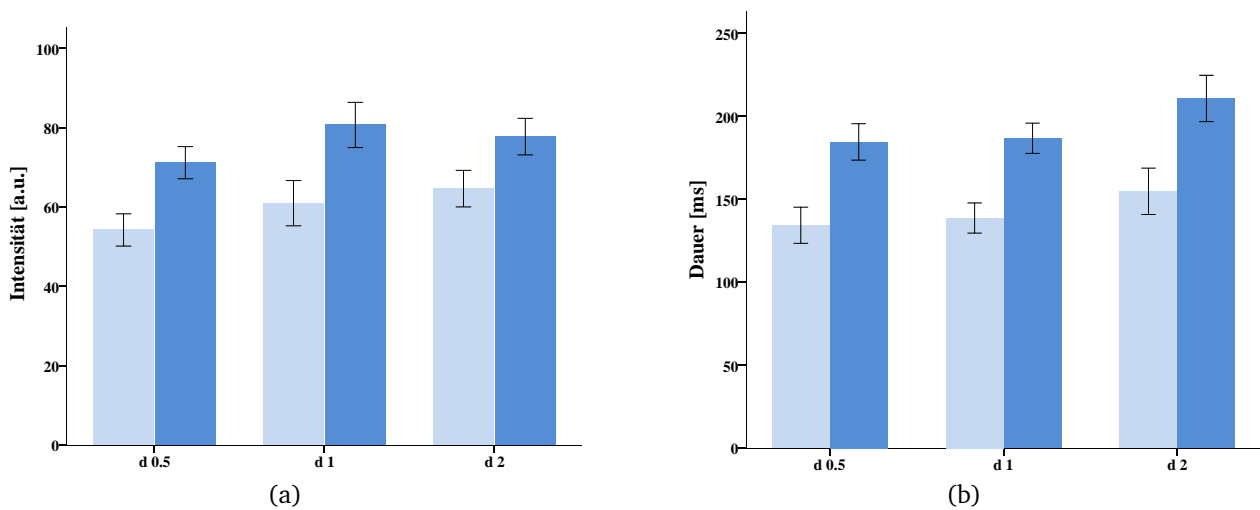


Abbildung 6.2: Signifikant stärkere Tastendruckintensität (a) (in arbitrary units = a.u.) und Dauer (b) der wiederholten Tastendrucke (dunkelblau) während einer Verzögerung von 0,5, 1 und 2 Sekunden im Vergleich zum jeweils ersten Tastendruck (hellblau). Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

ander ($F(2, 44) = 11,09; p < 0,01$). Der Trendtest zeigt, dass ein signifikanter linearer Anstieg vorliegt ($F(1, 22) = 12,28; p < 0,01$). Je länger die Verzögerung andauert, desto häufiger wiederholen Probanden ihre Eingabe. Dieser Befund entspricht Hypothese (a). Zur Überprüfung der Hypothese (b), wurden die Mittelwerte der Intensität und der Dauer dieser wiederholten Tastendrucke mit den Mittelwerten des jeweils ersten Tastendrucks der Trials verglichen. Die Varianzanalyse für wiederholte Messungen ergab sowohl für die Dauer ($F(1, 16) = 37,54; p < 0,01$) als auch für die Intensität ($F(1, 16) = 19,34; p < 0,01$) einen signifikanten Unterschied zwischen dem ersten und dem wiederholten Tastendruck. Nicht alle Probanden wiederholten den Tastendruck in allen drei Verzögerungsbedingungen (siehe Tabelle 6.2). Für jede Verzögerungsbedingung (d0.5, d1 und d2) wurde post-hoc ein *t*-Test für verbundene Stichproben berechnet, der den ersten mit dem wiederholten Tastendruck vergleicht. Die Ergebnisse der Statistik (Bonferroni korrigiert) sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Die Analyse zeigt, dass die Probanden den Taster in allen drei Verzögerungsbedingungen länger und mit erhöhter Kraft betätigen, wenn sie ihre Eingabe wiederholen (siehe Abbildung 6.2).

Tabelle 6.3: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der Reaktionszeiten, der Tastendruckdauer und der Tastendruckintensität (in arbitrary units = a.u.) in Trials, die verzögerten Rückmeldungen (d0.5, d1, d2) oder sofortigen Rückmeldungen (d0) folgten.

	post d 0.5		post d 1		post d 2		post d 0	
Reaktionszeit [ms]	612,1	(106,7)	620,6	(105,2)	613,0	(81,2)	627,0	(98,2)
Dauer [ms]	168,1	(7,5)	169,5	(9,0)	167,7	(6,9)	160,1	(8,8)
Intensität [a.u.]	74,9	(2,4)	73,6	(3,7)	79,9	(3,8)	67,1	(3,3)

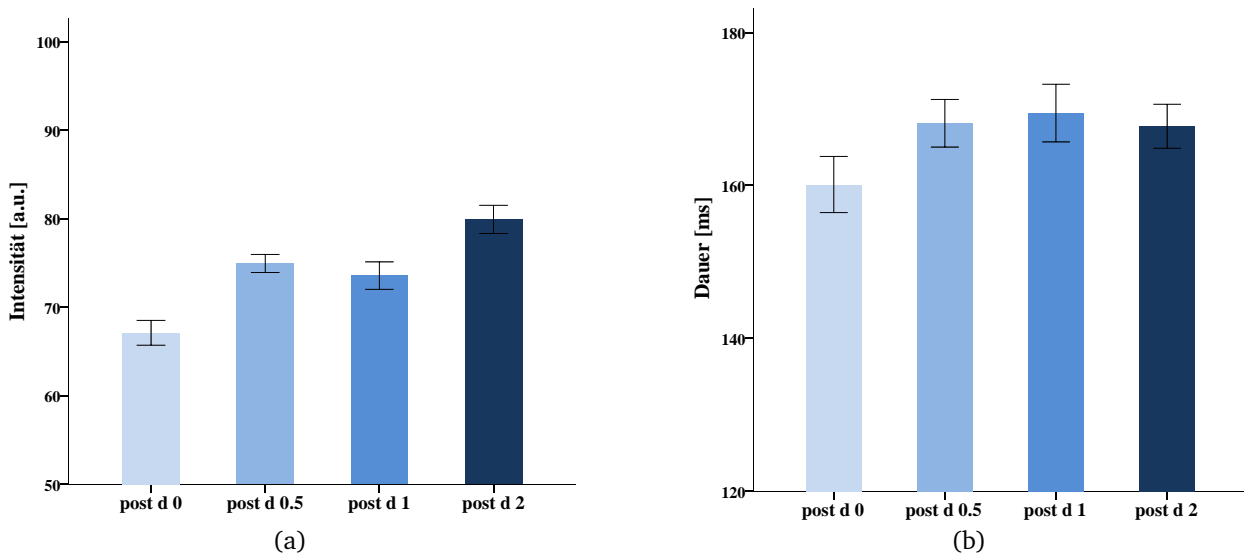


Abbildung 6.3: Signifikant höhere Tastendruckintensität (a) (in arbitrary units = a.u.) und Dauer (b) in Trials nach verzögerten Rückmeldungen von 0,5, 1 oder 2 Sekunden verglichen mit Trials, die sofortigen Rückmeldungen (post d 0) folgten. Fehlerbalken bilden Standardfehler ab.

Zur Analyse der Auswirkungen von Verzögerungen auf die Tastendruckdynamik im nachfolgenden Trial (Hypothese (c)) wurden die Mittelwerte für die Dauer und für die Intensität der Tastendrucke berechnet, die verzögerten bzw. sofortigen Rückmeldungen folgten. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Die vier Stufen des Faktors Verzögerung (d0, d0.5, d1, d2) unterscheiden sich sowohl in ihrer Intensität ($F(3, 66) = 42,13$; $p < 0,01$) als auch in ihrer Dauer ($F(3, 66) = 4,70$; $p < 0,01$) signifikant voneinander (siehe Abbildung 6.3). Die Dauer des Tastendrucks ist in den Trials signifikant länger, die verzögerten Rückmeldungen folgen, unabhängig von der Dauer der Verzögerung (**post d0.5:** $F(1, 22) = 9,70$; $p < 0,01$, **post d1:** $F(1, 22) = 8,81$; $p < 0,01$, **post d2:** $F(1, 22) = 6,95$; $p < 0,05$). Auch die Intensität ist unabhängig von der Dauer der Verzögerungen nach Trials mit verzögerten Rückmeldungen signifikant erhöht (**post d0.5:** $F(1, 22) = 69,38$; $p < 0,01$, **post d1:** $F(1, 22) = 33,01$; $p < 0,01$, **post d2:** $F(1, 22) = 91,94$; $p < 0,01$). Die drei Verzögerungsbedingungen (post d0.5, post d1, post d2) unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Eine Zunahme der Intensität und der Dauer des nachfolgenden Tastendrucks mit der Länge der Verzögerung konnte nicht nachgewiesen werden.

6.5 Diskussion

Verzögerungen in der Systemantwort beeinflussen das Tastendruckverhalten von Nutzern. Erwarten Nutzer eine sofortige Rückmeldung des Systems, veranlassen bereits Verzögerungen von 500 ms den Nutzer zur erneuten Eingabe seiner Antwort. Diese wiederholte Eingabe wird mit

einer stärkeren Intensität und längeren Dauer ausgeführt, als die ursprüngliche Eingabe des Nutzers. Das Ergebnis bestätigt die beiden ersten Hypothesen (a) und (b) und steht im Einklang mit den Vorhersagen von Mandler (1964). Unterbrechungen einer Handlungssequenz, bspw. durch Verzögerungen einer erwarteten Systemantwort, führen nach Mandler (1964) zur Wiederholung der Handlung und zu einer Zunahme der Intensität (Kraft) während der erneuten Ausführung der Handlung (siehe Abschnitt 1.3.1, Seite 14). Interindividuell betrachtet ist das Verhalten der Probanden sehr unterschiedlich, wenn eine Verzögerung der Systemantwort auftritt. Hierbei zeichnen sich drei 'typische' Gruppen ab. Zum einen Probanden, die zu keinem Zeitpunkt der Interaktion den Taster wiederholt betätigen ($n = 3$), zum anderen solche Probanden, die während der gesamten Interaktion immer wieder ihre Eingabe wiederholen, sobald Verzögerungen auftreten ($n = 8$) und schließlich die Probanden, welche nur zu Beginn der Interaktion wiederholt den Taster betätigen ($n = 12$). Die Ergebnisse zeigen auch, dass mit der Zunahme der Dauer der Verzögerung die Anzahl wiederholter Tastendrucke steigt. Möglicherweise lassen sich Unterschiede im beschriebenen Verhalten zwischen den Probanden auf Persönlichkeitseigenschaften zurückführen. Holling (1989) versuchte in seiner Arbeit einen Zusammenhang zwischen Persönlichkeitsfaktoren und physiologischen Stressreaktionen während verzögerter Systemantworten herzustellen. Allerdings fand er keinen Zusammenhang, was nach seiner Auffassung auf eine zu ungenaue Einteilung der abgefragten Persönlichkeitsdimensionen zurückzuführen ist.

Im Hinblick auf die vorliegenden neuronalen Aktivitätsunterschiede während verzögerter und sofortiger Systemantworten in Studie II und III liefert das Tastendruckverhalten der Probanden einen möglichen Erklärungsansatz. Wie in Abschnitt 4.2.9.2 (Seite 75) bereits erwähnt, wird die erhöhte Aktivität im LPI möglicherweise durch motorische Planungsprozesse hervorgerufen, die während unerwartet verzögerter Systemantworten angestoßen werden. Rushworth et al. (2003) schlussfolgern, dass der linke LPI immer dann aktiviert ist, wenn Probanden Bewegungen planen oder zu einer beabsichtigten Bewegung wechseln. Es gilt als ein Areal für motorische Aufmerksamkeit (Rushworth et al., 2003). Die Wiederholung des Tastendrucks während verzögerter Rückmeldungen belegt, dass motorische Planungsprozesse angestoßen werden, deren Ausführung aber möglicherweise von der Länge der Verzögerung abhängt.

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen ebenfalls die Hypothese (c), wonach Verzögerungen der Systemrückmeldung einen Einfluss auf die Dynamik nachfolgender Tastendrucke haben. Nutzereingaben, die verzögerten Rückmeldungen folgen, werden mit größerer Intensität und längerer Dauer ausgeführt als solche Eingaben, die sofortigen Rückmeldungen folgen. Einen Einfluss auf die Reaktionszeiten, wie in Hypothese (d) vermutet, konnte nicht nachgewiesen werden. Dies widerspricht den Befunden von Szameitat et al. (2009), die eine Verlangsamung der Reaktionszeiten nach verzögerten Systemantworten fanden. Szameitat et al. (2009) wählten eine Aufgabe, in der bestimmte Routinen abgearbeitet werden mussten, um ein Aufgabenziel zu erreichen. Möglicherweise überlagerte in der vorliegenden Studie das Lösen der kognitiv

anspruchsvolleren Kategorisierungsaufgabe den Effekt der Verzögerung auf die Reaktionszeiten der Probanden. Aus den Ergebnissen der Tastendruckdynamik kann aber in Anlehnung an Szameitat et al. (2009) geschlossen werden, dass Verzögerungen sowohl zu lokalen Kosten führen, da die Probanden den Taster wiederholt betätigen, als auch globale Kosten verursachen, da nachfolgende Tastendrucke ebenfalls mit stärkerer Intensität und längerer Dauer ausgeführt werden.

Die Auswertung der in diesem Experiment ebenfalls erhobenen physiologischen Parameter zeigt, dass während verzögerter Systemantworten der Hautleitwert ansteigt und die Herzrate abnimmt (Kohrs et al., 2014). Der Anstieg des Hautleitwerts während verzögerter Systemantworten steht im Einklang mit früheren Studien von Holling (1989) und Kuhmann et al. (1987) (vgl. Abschnitt 1.2.3, Seite 11). Der Anstieg des Hautleitwerts während verzögerter Systemantworten spricht dafür, dass diese für den Nutzer unerwarteten Ereignisse zu einer Orientierungsreaktion (OR) des Organismus führen (siehe Abschnitt 1.4.2, Seite 19). Ein Anstieg des Hautleitwerts ist kennzeichnend für eine OR, die immer dann auftritt, wenn sich Umweltbedingungen ändern, die für den Organismus und dessen zukünftiges Handeln von Bedeutung sind (Ben-Shakhar, 1994). Möglicherweise führt eine solche OR dazu, dass motorische Planungsprozesse angestoßen werden, die - wie oben beschrieben - zur Aktivierung des LPI, dem Areal für motorische Aufmerksamkeit beitragen.

Die Ergebnisse der Studie IV bestätigen die Hypothese (e), wonach nicht nur Verzögerungen die Tastendruckdynamik beeinflussen, sondern auch Unterschiede zwischen korrekten und inkorrekten Eingaben zu beobachten sind. Korrekte Eingaben werden mit stärkerer Intensität und längerer Dauer ausgeführt als inkorrekte Eingaben. Möglicherweise spiegelt das zaghafte Betätigen des Tasters die Unsicherheit der Probanden hinsichtlich der Korrektheit ihrer Antwort beim Lösen der Kategorisierungsaufgabe wider. Auch die Reaktionszeiten weisen signifikante Unterschiede zwischen korrekten und inkorrekten Eingaben auf. Korrekte Eingaben erfolgen schneller als inkorrekte Antworten.

Die Messung der Tastendruckdynamik könnte in zukünftigen technischen Systemen zusammen mit weiteren Verhaltensparametern wie der Reaktionszeit hilfreich sein, um adaptiv auf die Intentionen des Nutzers zu reagieren und ihn in seinem Handeln zu unterstützen.

Teil III

Allgemeine Diskussion

7 Modalität und Informationsgehalt der Rückmeldungen

7.1 Zusammenfassung

Der Einfluss des Informationsgehalts einer Systemrückmeldung auf das Verhalten von Nutzern und die Auswirkungen auf die neuronale Aktivität wurden in der Studie I anhand des Vergleichs bewertender und registrierender Rückmeldungen untersucht. Während die Verhaltensparameter (Reaktionszeit und Fehlerrate) keine signifikanten Unterschiede aufweisen, kommt es in mehreren Hirnregionen zu einem signifikanten Anstieg der Aktivität, wenn Rückmeldungen die Korrektheit der Nutzereingabe bewerten. Zu diesen Regionen zählen der Gyrus cinguli posterior, die Insula und der Nucleus ruber. Funktionell sind alle drei Regionen an Prozessen der Aufmerksamkeitszuweisung und der kognitiven Kontrolle beteiligt (siehe Abschnitt 3.5.2, Seite 45, 47 und 48). Die Rückmeldung über die Korrektheit der Nutzereingabe beinhaltet für den Nutzer wichtige Informationen für sein weiteres Handeln. Negative und positive Rückmeldungen stoßen den Lernprozess an und beeinflussen durch ihren zusätzlichen Informationsgehalt das zukünftige Nutzerverhalten. Die Stärke der neuronalen Aktivität in den zuvor genannten Regionen scheint ein Korrelat für die Bedeutung der Rückmeldung zu sein. Im Striatum, einer Kernregion des Belohnungssystems, liegt - anders als vermutet - kein signifikanter Unterschied zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen vor. Beide Bedingungen aktivieren diese Region gleichermaßen. Dass bereits einfache registrierende Rückmeldungen zu einer erhöhten Aktivität in dieser Region führen, zeigen die Befunde von Behne et al. (2008) und Kohrs et al. (2012). Zahlreiche Studien fanden jedoch, dass positive Rückmeldungen zu einer stärkeren Aktivität führen als negative oder neutrale Rückmeldungen (Delgado, 2007; Nieuwenhuis et al., 2005a,b; O'Doherty, 2004). In der vorliegenden Arbeit können positiv und negativ bewertende Rückmeldungen aufgrund des Designs nicht getrennt voneinander ausgewertet werden. Möglicherweise verdeckt dies einen Aktivitätsunterschied im Striatum zwischen positiven und negativen Rückmeldungen. Ein Experiment im *event related*-Design sollte mögliche Unterschiede in dieser Region aufdecken können.

Spezifisch für die visuelle Modalität kommt es in visuellen Assoziationsarealen (BA 19 und 37) zu einem Anstieg der neuronalen Aktivität während bewertender Rückmeldungen (siehe Ab-

schnitt 3.5.2, Seite 50). Auch im STS (BA 22), einem multimodalen Areal für visuelle und auditorische Integration (Calvert, 2001; Driver & Noesselt, 2008), zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen bewertenden und registrierenden Rückmeldungen innerhalb aller drei Modalitäten. Nach Driver & Noesselt (2008) beeinflusst diese Region *top-down* primäre auditorische und visuelle Areale. Während in der vorliegenden Studie ein modalitätsspezifischer Einfluss der bewertenden Rückmeldungen auf visuelle Assoziationsareale vorliegt, wird diese Aktivität in auditorischen Assoziationsarealen möglicherweise durch die Aktivität überlagert, welche durch die auditorische Kategorisierungsaufgabe ausgelöst wird. Andere Studien konnten dennoch zeigen, dass die Art der Rückmeldung während einer auditorischen Kategorisierungsaufgabe die neuronale Aktivität im auditorischen Kortex und im Gyrus temporalis medius modulieren kann (Weis et al., 2013). So erhöhten belohnende Rückmeldungen in Form von monetären Gewinnen und das Ausbleiben von monetären Verlusten die Aktivität des auditorischen Kortex (Weis et al., 2013). Möglicherweise sind die in der Studie I verwendeten positiven und negativen Rückmeldungen nicht ausreichend belohnend, um einen ähnlichen modalitätsspezifischen Effekt in primär sensorischen Arealen auszulösen.

Ausgehend von der vorliegenden Studie gilt es in zukünftigen Forschungsarbeiten zu überprüfen, ob eine Änderung der Aufgabenmodalität (bspw. eine visuelle Kategorisierungsaufgabe) zu modalitätsspezifischen Unterschieden zwischen auditorisch bewertenden und registrierenden Rückmeldungen im auditorischen Kortex und angrenzenden Arealen führt. Die Präsentation der Rückmeldung in einer anderen sensorischen Modalität als die zu lösende Aufgabe erscheint sinnvoll, da bspw. Sehen und Hören auf unterschiedliche Aufmerksamkeitsressourcen zurückgreifen (Arrighi et al., 2011). Die Informationsübertragung sollte daher auf unterschiedliche Modalitäten aufgeteilt werden, um die Aufmerksamkeitsressourcen der Nutzer zu maximieren (Arrighi et al., 2011). Die Befragung der Probanden unterstreicht diese Annahme, da die Mehrzahl der Probanden visuelle Rückmeldungen während der akustischen Kategorisierungsaufgabe bevorzugte.

7.2 Auswirkungen auf die HCI

Die Befunde der ersten Studie lassen sich nur schwer verallgemeinern und auf die HCI übertragen, da die bevorzugte Modalität in der Mensch-Computer-Interaktion stark von individuellen Vorlieben der Nutzer beeinflusst wird und abhängig vom spezifischen Kontext der Aufgabenstellung ist (Kong et al., 2011; Perrin et al., 2008; Schüssel et al., 2012). Aus den Befunden von Perrin et al. (2008) und den Ergebnissen der vorliegenden Studie lässt sich dennoch ableiten, dass vor allem visuelle Rückmeldungen in Form von Piktogrammen vom Nutzer bevorzugt werden. So zeigt die vorliegende Arbeit und die Studie von Perrin et al. (2008), dass Probanden diese Art der Rückmeldungen gegenüber Tönen oder Wörtern bevorzugen. Zudem fanden

Perrin et al. (2008), dass Probanden bei visuellen Rückmeldungen schneller und mit weniger Fehlern antworten.

Der Informationsgehalt einer Rückmeldung scheint die Mensch-Computer-Interaktion ebenfalls zu beeinflussen. Die Ergebnisse der funktionellen Daten legen nahe, dass informationsreiche Systemantworten den Nutzer stärker in die aktuelle Interaktion involvieren. Vor allem Areale der Aufmerksamkeitszuweisung und der kognitiven Kontrolle werden durch bewertende Rückmeldungen stärker aktiviert. Allerdings zeigen die Ergebnisse deutlich, dass registrierende und bewertende Rückmeldungen das Belohnungssystem gleichermaßen aktivieren. Dies unterstreicht die Annahme von Behne et al. (2008), dass registrierende Rückmeldungen (Empfangsbestätigungen) die Rahmenbedingung bilden, um den Dialog zwischen Mensch und System aufrecht zu erhalten. Nutzer technischer Systeme sollten daher immer eine minimale Empfangsbestätigung über ihre Eingabe vom System erhalten.

8 Verzögerungen der Systemantwort

8.1 Zusammenfassung

Die Studien II bis IV untersuchten den Einfluss verzögerter Systemantworten auf die neuronale Aktivität und auf das Verhalten von Nutzern. Anhand der funktionellen Daten konnte ein Netzwerk an Hirnregionen identifiziert werden, dessen Aktivität durch verzögerte Systemantworten verstärkt wird. Die Regionen, zu denen der pMFC, der ACC, die linke und rechte aI und der linke LPI zählen, werden in der Literatur als System der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle beschrieben (siehe Abschnitt 4.2.9.2, Seite 72 ff.) (Corbetta et al., 2008; Dosenbach et al., 2006, 2008). Speziell die Aktivität des pMFC scheint zeitliche Fehler in der Vorhersage (*temporal prediction error*) eines Ereignisses widerzuspiegeln (Forster & Brown, 2011). Je länger eine Verzögerung andauert, desto stärker ist der beobachtete Effekt auf die neuronale Aktivität. Sind die Verzögerungen jedoch so kurz, dass sie vom Nutzer nicht wahrgenommen werden, zeigt sich in der neuronalen Aktivität kein signifikanter Unterschied zu sofortigen Systemantworten. Wie Studie II gezeigt hat, ist diese Schwelle einer gerade noch wahrnehmbaren Verzögerung abhängig von der Aufgabenstellung und der damit einhergehenden kognitiven Beanspruchung sowie vom Alter der Nutzer. Ist die Aufgabenstellung wenig anspruchsvoll, so erreichen junge Probanden im Mittel eine Schwelle von 200 ms. Dieser Wert stimmt mit Beobachtungen aus der HCI-Forschung überein (Miller, 1968; Shneiderman, 1984). Steigt die Schwierigkeit der zu lösenden Aufgabe, so steigt auch die Schwelle einer gerade noch wahrnehmbaren Verzögerung. Im vorliegenden Experiment liegt der Wert für junge Probanden im Mittel bei 330 ms. Die Wahrnehmungsschwelle älterer Nutzer liegt jeweils signifikant über den Werten der jungen Probanden. Anders als vermutet konnte kein Unterschied in der neuronalen Aktivität zwischen jungen und älteren Probanden nachgewiesen werden, der unmittelbar auf die unterschiedliche Wahrnehmung verzögerter Systemantworten zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen jungen und älteren Probanden der Studie II in frontalen Regionen stammen vielmehr aus einem alters-typischen frontalen Hypometabolismus (Garraux et al., 1999; Moeller et al., 1996) und sind unabhängig von den Verzögerungen der Systemantwort.

Sechs junge und sieben ältere Probanden gaben an, die Verzögerungen der Systemantwort während der Interaktion im MR-Tomographen nicht bemerkt zu haben. Aber auch bei ihnen zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Aktivität im Netzwerk der Aufmerksamkeits- und Handlungs-

kontrolle während verzögerter Systemantworten. Die Schwelle einer gerade noch wahrnehmbaren Verzögerung dieser Probanden unterscheidet sich nicht vom Gruppenmittelwert. Möglicherweise nahmen sie die Verzögerungen der Systemantworten als weniger störend wahr als die übrigen Probanden und konnten sich aus diesem Grund bereits nach wenigen Minuten nicht mehr an die Verzögerungen in der zurückliegenden Interaktion erinnern. Allerdings deutet die Analyse der Hirnaktivität auch bei diesen Probanden darauf hin, dass die Interaktion mit dem System nicht optimal verläuft und zusätzliche kognitive Ressourcen benötigt werden, sobald die Verzögerungen an und über der Wahrnehmungsschwelle liegen.

Wie die Ergebnisse der Studie III zeigen, ist die Aktivität im identifizierten neuronalen Netzwerk abhängig von der Nutzererwartung. Eine Aktivierung des neuronalen Netzwerks durch verzögerte Systemantworten wird nur dann beobachtet, wenn die Verzögerungen für den Nutzer unerwartet auftreten. Regelmäßig auftretende Verzögerungen fordern demnach kaum zusätzliche Aufmerksamkeitsressourcen. Dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen von (Shneiderman, 1984), nach denen Nutzer in der Lage sind, ihr Verhalten an verzögerte Systemantworten anzupassen, wenn diese regelmäßig auftreten. Wie die Ergebnisse des zweiten Kontroll-experiments zeigen, ist diese Aussage nur haltbar, solange das System als verlässlich wahrgenommen wird. Treten im Dialog zwischen Nutzer und System Interaktionssequenzen auf, in denen die Systemantwort (Empfangsbestätigung des Systems) ausbleibt, erhöht sich folgend die neuronale Aktivität während verzögerter Systemantworten im Vergleich zu sofortigen Systemantworten. Eine Anpassung an die Verzögerungen findet trotz des häufigen Auftretens während der gesamten Dauer des zweiten Kontroll-experiments nicht statt. Allerdings führt das Ausbleiben der Systemantwort zu einer weitaus stärkeren Aktivität im Netzwerk aus aI und pMFC als häufig verzögerte Systemantworten. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Befunden der Studie von Kohrs et al. (2012), in der unerwartet verzögerte Rückmeldungen und das Ausbleiben der erwarteten Rückmeldung das Netzwerk aus pMFC und aI gleichermaßen aktivierten, so wird deutlich, dass sowohl die Auftretenswahrscheinlichkeit einer verzögerten Systemantwort als auch die Vertrauenswürdigkeit in das System die neuronale Aktivität während verzögerter Systemantworten modulieren. Folgende vier Schlussfolgerungen lassen sich aus den vorliegenden Daten ziehen:

1. Wird das System vom Nutzer als vertrauenswürdig (die Interaktion als sicher) wahrgenommen und treten Verzögerungen regelmäßig auf, benötigt der Nutzer kaum zusätzliche kognitive Ressourcen zur Aufrechterhaltung der Interaktion (siehe Studie III, Kontroll-experiment 1, Seite 78 ff.).
2. Ist der Dialogverlauf aufgrund vereinzelt ausbleibender Rückmeldungen unsicher, führen selbst regelmäßige Verzögerungen der Systemantwort zu einem Anstieg der neuronalen Aktivität (siehe Studie III, Kontroll-experiment 2, Seite 78 ff.).

3. Kommt es in einem zuverlässig antwortendem System unerwartet zu Verzögerungen, steigt die neuronale Aktivität mit der Dauer der Verzögerung an (siehe Studie II, Seite 55 ff.).

4. Treten in einem als unzuverlässig wahrgenommenen System Verzögerungen der Systemantwort unerwartet auf, beansprucht dies die neuronalen Aufmerksamkeitsressourcen im gleichen Maß wie das Ausbleiben einer erwarteten Systemantwort (vgl. Kohrs et al. (2012)).

Möglicherweise spiegelt die erhöhte Aktivität während verzögerter Systemantworten eine Orientierungsreaktion (siehe Abschnitt 1.4.2, Seite 19) wider. Aufgrund der fehlenden Empfangsbestätigung durch das System ist der Nutzer unsicher, ob seine Eingabe registriert wurde oder ob er diese wiederholen sollte. Vermutlich werden daraufhin Prozesse der Handlungsplanung angestoßen und die motorische Aufmerksamkeit des Nutzers auf die Wiederholung seiner Eingabe gelenkt. Vor allem die Aktivität des linken LPI spricht für diese Interpretation der funktionellen Daten (siehe Abschnitt 4.2.9.2, Seite 75). Dass Verzögerungen der Systemantwort tatsächlich motorische Planungsprozesse anstoßen, zeigen die Ergebnisse der Studie IV. Entsprechend der Theorie Mandlers 1964 (siehe Abschnitt 1.3.1, Seite 14) führen Unterbrechungen im Interaktionsverlauf zwischen System und Nutzer zur Wiederholung der Nutzereingabe. Der wiederholte Tastendruck erfolgt mit stärkerer Intensität und ist signifikant länger als der erste Tastendruck der Antworteingabe. Die Auswirkungen verzögerter Systemantworten auf die Tastendruckdynamik sind nicht nur unmittelbar zu beobachten, sondern wirken sich auch auf nachfolgende Tastendrucke aus. Allerdings deuten die Ergebnisse der Studie IV darauf hin, dass die Reaktionen auf verzögerte Systemantworten individuell sehr verschieden sind. Zukünftige Studien sollten dies berücksichtigen und Persönlichkeitseigenschaften identifizieren, die das unterschiedliche Verhalten erklären.

8.2 Auswirkungen auf die HCI

Die Studien II und III bestätigen die Beobachtungen aus der HCI-Forschung, wonach die Wahrnehmung und Toleranz einer verzögerten Systemantwort von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Sowohl äußere Faktoren, wie die Aufgabenschwierigkeit und die damit einhergehende kognitive Beanspruchung, als auch individuelle Faktoren, wie das Alter der Nutzer bedingen die Schwelle einer gerade noch wahrnehmbaren Verzögerung der Systemantwort. Die in Studie II ermittelten Wahrnehmungsschwellen einer Verzögerung unterstreichen die Empfehlungen aus der HCI-Literatur. So sollten SRZ während einer Routineaufgabe und den von Dabrowski & Munson (2011) beschriebenen Kontrollaufgaben unterhalb von 200 ms liegen (siehe Abschnitt 1.2.4, Seite 14). Nur so ist garantiert, dass Nutzer die Verzögerungen nicht bewusst wahrnehmen und ihnen das Gefühl vermittelt wird, die Kontrolle über das System zu besitzen.

Liegen die Verzögerungen der Systemantwort oberhalb der Wahrnehmungsschwelle, so zeigen die funktionellen Daten der Studie II einen Anstieg der neuronalen Aktivität im Netzwerk

der Aufmerksamkeits- und Handlungskontrolle. Verzögerungen der Systemantwort beanspruchen zusätzliche kognitive Ressourcen und lenken den Aufmerksamkeitsfokus des Nutzers vom angestrebten Interaktionsziel auf die aktuelle Unterbrechung der Kommunikation. Dies hat zur Folge, dass Planungsprozesse angestoßen werden, um die Unterbrechung der Kommunikation zu beenden. Wie Studie IV zeigt, wiederholen Nutzer ihre Eingabe, wenn Verzögerungen der Systemantwort auftreten und sie führen diese Wiederholung der Eingabe mit mehr Kraft aus als zuvor. Verzögerungen verursachen auf Nutzerseite zusätzliche (kognitive) Kosten und stören die reibungslose Kommunikation mit dem System. Möglicherweise ist der Anstieg der neuronalen Aktivität ein Korrelat dafür, dass eine Verzögerung vom Nutzer als störend empfunden wird. Es erscheint daher sinnvoll, dem Nutzer immer dann eine Empfangsbestätigung zu präsentieren, wenn Verzögerungen der Systemantwort zu erwarten sind. Informiert man den Nutzer nicht und lässt ihn im Unklaren, ob seine Eingabe registriert wurde, so führt dies nach Seow (2008) dazu, dass die Zeitwahrnehmung verlangsamt wird. Dieser Effekt könnte zusätzlich dazu beitragen, dass Verzögerungen als störend wahrgenommen werden.

Können Verzögerungen der Systemantwort nicht ausgeschlossen werden, so scheint es entsprechend der Studie III sinnvoll zu sein, jede Systemantwort regelmäßig mit einer konstanten Verzögerung zu präsentieren. Auch Shneiderman & Plaisant (2005) postulieren, dass konstante SRZ gegenüber variablen zu bevorzugen sind, da der Nutzer in der Lage ist, sein Verhalten anzupassen. Aber auch diese Vorgehensweise ist mit Nachteilen verbunden. So sinkt bspw. die Zufriedenheit der Nutzer mit der Dauer der durchschnittlichen Antwortzeiten eines Systems (Dabrowski & Munson, 2011) (siehe Abschnitt 1.2.3, Seite 10).

Neben der zeitlichen Konstanz der SRZ beeinflusst auch das Vertrauen des Nutzers in das System die Stärke der neuronalen Aktivität. Eine geringe Vertrauenswürdigkeit, hervorgerufen durch Kommunikationsabbrüche, verstärkt den negativen Effekt verzögerter Systemantworten auf die neuronale Aktivität. Besonders in netzwerkbasierenden Anwendungen und in mobilen Systemen kommt es netzbedingt zu Abbrüchen der Kommunikation (Glier, 2005) (siehe Abschnitt 1.4.1, Seite 16). Für einen erfolgreichen Dialogverlauf sind derartige Kommunikationsabbrüche zu vermeiden.

Die Auswertung der Tastendruckdynamik zur Analyse des Nutzerverhaltens hat sich in der vorliegenden Arbeit als hilfreich erwiesen. Die Verwendung druck-sensibler Systeme zur Analyse des Nutzerverhaltens könnte auch zukünftig in der HCI-Forschung eingesetzt werden, bspw. zur Erkennung von Emotionen (vgl. Epp et al. (2011)) oder zur Klassifizierung von Nutzertypen. Dies wiederum könnte zur Entwicklung adaptiver Systeme beitragen, die ihre Systemantworten besser als bisher an den einzelnen Nutzer anpassen.

A Fragebögen

A.1 Fragebogen Studie I

Proband:

Meßdatum:

1. Wie schwierig empfandest du die Aufgabe (Zutreffendes bitte ankreuzen)

Leicht

Schwer

1 2 3 4 5 6 7

2. Welche Art (neutral oder bewertend) der Rückmeldung bevorzugst du?
3. Welche Modalität (visuell, verbal, auditorisch) der Rückmeldung empfandest du als angenehm? Und welche eher nicht?
4. Empfandest du eine Modalität als störend?
5. Hattest du den Eindruck während der bewertenden oder der neutralen Rückmeldungen mehr Fehler zu machen?
6. Waren die bewertenden Rückmeldungen intuitiv verständlich?
7. Warst du sowohl während neutraler als auch während bewertender Rückmeldungen auf das Lösen der Aufgabe konzentriert?
8. Hat dich die neutrale Rückmeldung motiviert? Wenn ja, welche Modalität am stärksten?
9. Waren die Verzögerungen gleich lang?
10. Hat dich die bewertende Rückmeldung motiviert? Wenn ja, welche Modalität am stärksten?
11. sonstige Bemerkungen

A.2 Fragebogen Studie II

Proband:

Meßdatum:

1. Wie schwierig empfanden Sie die Aufgabe (Zutreffendes bitte ankreuzen)

Leicht

Schwer

1 2 3 4 5 6 7

2. Hatten Sie das Gefühl, die Aufgabe am Ende des Experimentes besser lösen zu können als zu Beginn?

3. Haben Sie eine spezielle Strategie zum Lösen der Aufgabe benutzt? Wenn ja, welche?

4. Haben Sie die Rückmeldungen während der gesamten Untersuchungsdauer beachtet?

5. War die Rückmeldung motivierend für Sie?

6. Kam die Rückmeldung immer sofort nachdem Sie geantwortet haben?

7. Haben Sie bemerkt, dass einige Rückmeldungen verzögert kamen? Wenn ja, ist Ihnen dies nur am Anfang aufgefallen oder während des gesamten Experiments?

8. Wie war ihre Reaktion auf die verzögerte Rückmeldung? Haben Sie die Tasten wiederholt gedrückt?

9. Waren die Verzögerungen gleich lang?

10. Hat die verzögerte Rückmeldung bestimmte Emotionen bei Ihnen hervorgerufen? Wenn ja, welche?

11. Wie viele Verzögerungszeiten haben Sie bemerkt?

12. sonstige Bemerkungen

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

A.3 Fragebogen Studie III: Kontrollexperiment 1

Proband:

Meßdatum:

1. Wie schwierig empfanden Sie die Aufgabe (Zutreffendes bitte ankreuzen)

Leicht

Schwer

1 2 3 4 5 6 7

2. Hatten Sie das Gefühl, die Aufgabe am Ende des Experimentes besser lösen zu können als zu Beginn?

3. Haben Sie eine spezielle Strategie zum Lösen der Aufgabe benutzt? Wenn ja, welche?

4. Haben Sie die Rückmeldungen während der gesamten Untersuchungsdauer beachtet?

5. War die Rückmeldung motivierend für Sie?

6. Kam die Rückmeldung immer sofort nachdem Sie geantwortet haben?

7. Haben Sie bemerkt, dass einige Rückmeldungen verzögert kamen? Wenn ja, ist Ihnen dies nur am Anfang aufgefallen oder während des gesamten Experiments?

8. Hat die verzögerte Rückmeldung bestimmte Emotionen bei Ihnen hervorgerufen? Wenn ja, welche?

9. Empfanden Sie die Verzögerungen als störend? Wenn ja, während des gesamten Experimentes?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

A.4 Fragebogen Studie III: Kontrollexperiment 2

Proband:

Meßdatum:

1. Wie schwierig empfanden Sie die Aufgabe (Zutreffendes bitte ankreuzen)
Leicht Schwer
1 2 3 4 5 6 7
2. Hatten Sie das Gefühl, die Aufgabe am Ende des Experimentes besser lösen zu können als zu Beginn?
3. Haben Sie eine spezielle Strategie zum Lösen der Aufgabe benutzt? Wenn ja, welche?
4. Haben Sie bemerkt, dass das Ausbleiben der Rückmeldung Teil des Experiments ist?
5. Wie war ihre Reaktion auf das Ausbleiben der Rückmeldung? Wie haben Sie sich gefühlt?
6. Haben Sie die Rückmeldungen während der gesamten Untersuchungsdauer beachtet?
7. War die Rückmeldung motivierend für Sie?
8. Kam die Rückmeldung immer sofort nachdem Sie geantwortet haben?
9. Haben Sie bemerkt, dass einige Rückmeldungen verzögert kamen? Wenn ja, ist Ihnen dies nur am Anfang aufgefallen oder während des gesamten Experiments?
10. Hat die verzögerte Rückmeldung bestimmte Emotionen bei Ihnen hervorgerufen? Wenn ja, welche?
11. Empfanden Sie das Ausbleiben der Rückmeldung und die Verzögerungen als störend? Wenn ja, während des gesamten Experimentes?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

A.5 Fragebogen Studie IV

Proband:

Meßdatum:

1. Wie schwierig empfanden Sie die Aufgabe (Zutreffendes bitte ankreuzen)

Leicht

Schwer

1 2 3 4 5 6 7

2. Hatten Sie das Gefühl, die Aufgabe am Ende des Experimentes besser lösen zu können als zu Beginn?

3. Haben Sie eine spezielle Strategie zum Lösen der Aufgabe benutzt? Wenn ja, welche?

4. Haben Sie die Rückmeldungen während der gesamten Untersuchungsdauer beachtet?

5. War die Rückmeldung motivierend für Sie?

6. Kam die Rückmeldung immer sofort nachdem Sie geantwortet haben?

7. Haben Sie bemerkt, dass einige Rückmeldungen verzögert kamen? Wenn ja, ist Ihnen dies nur am Anfang aufgefallen oder während des gesamten Experiments?

8. Wie war ihre Reaktion auf die verzögerte Rückmeldung? Haben Sie die Tasten wiederholt gedrückt?

9. Waren die Verzögerungen gleich lang?

10. Hat die verzögerte Rückmeldung bestimmte Emotionen bei Ihnen hervorgerufen? Wenn ja, welche?

11. Haben sie bereits während des Experimentes bemerkt, dass die Verzögerungen Teil des Experimentes sind?

12. War die erreichte Punktzahl motivierend für Sie?

13. Fühlten sie sich durch die Zeitanzeige in der rechten unteren Ecke unter Druck gesetzt?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

B Tabellen

B.1 Studie II: Analyse der Regionen nach Altersgruppen

Table B.1: ROI Analyse der aktivierten Hirnregionen des Vergleichs der verzögerten (600ms) Rückmeldungen (RM) mit sofortigen Rückmeldungen (FDR < 0,05) für junge Probanden.

Region	200ms vs pos RM		400ms vs pos RM		neg vs pos RM	
	t	p	t	p	t	p
Aktivierung						
Gyrus frontalis medialis posterior	-1,54	0,14	4,04	0,00	6,88	0,00
Gyrus frontalis inferior RH	-2,90	0,01	4,15	0,00	4,95	0,00
Insula anterior RH	-1,84	0,08	5,74	0,00	7,02	0,00
Insula anterior LH	-1,51	0,14	6,68	0,00	7,24	0,00
Gyrus precentralis LH	-1,89	0,07	4,16	0,00	2,85	0,01
Lobus parietalis inferior LH	-1,97	0,06	3,64	0,00	2,25	0,03
Thalamus LH	-0,80	0,43	3,13	0,04	5,27	0,00
Thalamus RH	-1,38	0,18	3,15	0,00	5,14	0,00
Deaktivierung						
Gyrus cinguli anterior	-0,77	0,45	-1,18	0,25	-4,13	0,00
Gyrus cinguli anterior	-1,25	0,22	-1,15	0,26	-4,82	0,00
Gyrus cinguli posterior LH	-0,88	0,40	-0,86	0,40	-4,60	0,00
Gyrus temporalis medius LH	-2,50	0,02	-1,16	0,26	-5,97	0,00

B.1 Studie II: Analyse der Regionen nach Altersgruppen

Tabelle B.2: ROI Analyse der aktivierten Hirnregionen des Vergleichs der verzögerten (600ms) Rückmeldungen (RM) mit sofortigen Rückmeldungen (FDR < 0,05) für ältere Probanden.

Region	200ms vs pos RM		400ms vs pos RM		neg vs pos RM	
	t	p	t	p	t	p
Aktivierung						
Gyrus frontalis medialis posterior	3,27	0,00	5,08	0,00	2,75	0,01
Gyrus frontalis inferior RH	3,16	0,00	5,55	0,00	0,71	0,49
Insula anterior RH	0,51	0,62	4,84	0,00	2,35	0,03
Insula anterior LH	0,39	0,69	3,52	0,00	4,02	0,00
Gyrus precentralis LH	0,77	0,45	4,11	0,00	0,61	0,55
Lobus parietalis inferior LH	1,65	0,11	3,55	0,00	0,23	0,82
Thalamus LH	0,65	0,52	1,67	0,11	-0,56	0,58
Thalamus RH	0,54	0,59	3,06	0,00	-1,25	0,23
Deaktivierung						
Gyrus cinguli anterior	-0,89	0,39	-0,61	0,55	-2,96	0,01
Gyrus cinguli anterior	-0,57	0,58	-1,07	0,29	-2,88	0,01
Gyrus cinguli posterior LH	-0,35	0,73	-0,71	0,48	-3,52	0,00
Gyrus temporalis medius LH	-1,80	0,09	-2,69	0,01	-3,83	0,00

B.2 Studie II: Analyse der Probanden, die Verzögerungen nicht bemerkt haben

Tabelle B.3: ROI Analyse der aktivierten Hirnregionen der jungen Probanden, die die Verzögerungen während des fMRT Experiments nicht wahrgenommen haben ($N = 6$, FFX ROI-GLM).

Region	200ms vs pos RM		400ms vs pos RM		600ms vs pos RM	
	t	p	t	p	t	p
Gyrus frontalis medialis posterior	0,88	0,38	4,58	0,00	4,62	0,00
Gyrus frontalis inferior RH	-1,85	0,06	2,53	0,01	3,06	0,00
Insula anterior RH	-0,29	0,77	4,73	0,00	7,56	0,00
Insula anterior LH	-0,48	0,63	3,69	0,00	6,09	0,00
Lobus parietalis inferior LH	-0,52	0,60	2,01	0,04	5,26	0,00

Tabelle B.4: ROI Analyse der aktivierten Hirnregionen der älteren Probanden, die die Verzögerungen während des fMRT Experiments nicht wahrgenommen haben ($N = 7$, FFX ROI-GLM).

Region	200ms vs pos RM		400ms vs pos RM		600ms vs pos RM	
	t	p	t	p	t	p
Gyrus frontalis medialis posterior	1,22	0,22	1,86	0,06	4,93	0,00
Gyrus frontalis inferior RH	0,95	0,34	3,94	0,00	5,52	0,00
Insula anterior RH	-1,48	0,14	2,96	0,00	3,13	0,00
Insula anterior LH	-1,15	0,26	0,89	0,37	4,32	0,00
Lobus parietalis inferior LH	0,22	0,82	1,50	0,13	5,16	0,00

Abkürzungsverzeichnis

ACC Gyrus cinguli anterior

al anteriore Insula

ANOVA *Analysis of variance*

B_0 statisches Magnetfeld

B_1 Hochfrequenzimpuls

BA Brodmann-Areal

BOLD *Blood oxygen level dependent*

CPU *Central processing unit*

DN Nucleus dentatus

DTI Diffusions-Tensor-Bildgebung

EEG Elektroencephalographie

e Eulersche Zahl

EPI Echoplanare Bildgebungssequenz

ERN *Error related negativity*

FDR *False discovery rate*

fERN *Feedback error related negativity*

FFX *Fixed effects*

FID *Free induction decay*

FM Frequenz moduliert

fMRT funktionelle Magnetresonanztomographie

γ gyromagnetischen Verhältnis

GE Gradientenecho

GFI Gyrus frontalis inferior

GFM Gyrus frontalis medius

Abkürzungsverzeichnis

GFS	Gyrus frontalis superior
GLM	<i>General Linear Model</i>
GTI	Gyrus temporalis inferior
GTM	Gyrus temporalis medius
GTS	Gyrus temporalis superior
HCI	Mensch-Computer-Interaktion
HF	Hochfrequenz
IR	<i>Inversion recovery</i>
LH	linke Hemisphäre
LPI	Lobus parietalis inferior
mcRN	magnocellulärer Nucleus ruber
MPRAGE	<i>Magnetization-prepared rapid acquisition gradient echo</i>
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
μ	magnetisches Dipolmoment
M_{xy}	transversal Magnetisierung
M_z	longitudinal Magnetisierung
N100	Negativierung nach 100ms
Ncl	Nucleus
ν	Lamorfrequenz
OR	Orientierungsreaktion
P300	Positivierung nach 300ms
PCC	Gyrus cinguli posterior
pcRN	parvocellulärer Nucleus ruber
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
pMFC	posteriorer medialer frontaler Kortex
RFX	<i>Random effects</i>

Abkürzungsverzeichnis

RH rechte Hemisphäre

RM Rückmeldung

RN Nucleus ruber

ROI *Region of interest*

RT Reaktionszeit

s Sekunde

SE Spinecho

SRZ Systemresponsezeit

STS *Sulcus temporalis superior*

T_1 Zeitkonstante der longitudinalen Relaxation

T_2^* Zeitkonstante der gemessenen transversalen Relaxation

T_2 Zeitkonstante der idealen transversalen Relaxation

TE Echozeit

TI *Inversion time*

TR *Time of repetition*

VOI *Volume of interest*

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Verlauf der BOLD-Antwort	27
2.2	Tastensorik	31
3.1	Studie I: Aktivierung des posterioren Gyrus cinguli	43
3.2	Studie I: Aktivierung im Nucleus ruber	44
3.3	Studie I: Aktivierung in der Insula	45
3.4	Studie I: Aktivierung im Gyrus temporalis superior	46
3.5	Studie I: Aktivierung im Striatum	47
3.6	Studie I: Aktivierung in visuellen Arealen	48
4.1	Studie II: Korrelation von Schwelle und Fehleranzahl	54
4.2	Studie II: Aktivierung im posterioren medialen Frontalkortex	65
4.3	Studie II: Aktivierung in der anterioren Insula	65
4.4	Studie II: Aktivierung im Gyrus frontalis inferior	65
4.5	Studie II: Aktivierung im Lobus parietalis inferior	66
4.6	Studie II: Aktivierung im Gyrus cinguli anterior	66
4.7	Studie II: Aktivierung im posterioren medialen Frontalkortex	69
4.8	Studie II: Aktivierung in der anterioren Insula	69
4.9	Studie II: Aktivierung im Gyrus frontalis inferior	69
4.10	Studie II: Aktivierung im Putamen	70
4.11	Studie II: Aktivierung im Gyrus cinguli anterior	70
5.1	Studie III (Kontrollexperiment 1): Aktivierung im LPI, pMFC, aI	83
5.2	Studie III (Kontrollexperiment 2): Aktivierung im LPI und pMFC	84
6.1	Studie IV: Tastendruck korrekter vs inkorrekt Antworten	93
6.2	Studie IV: wiederholte Tastendrucke	94
6.3	Studie IV: Tastendruck nach verzögerten Rückmeldungen	95

Tabellenverzeichnis

3.1	Studie I: Rückmeldungen	38
3.2	Studie I: Reaktionszeiten nach registrierenden und bewertenden Rückmeldungen	40
3.3	Studie I: aktivierte Hirnregionen: Informationsgehalt der Rückmeldung	42
3.4	Studie I: aktivierte Hirnregionen: Modalität der Rückmeldung	42
4.1	Studie II (Vorstudie): Schwelle und Fehlerrate der Schwellenbestimmung	54
4.2	Stimuli: Frequenzbereich der leichten FM Töne	57
4.3	Stimuli: Frequenzbereich der schweren FM Töne	57
4.4	Studie II: Schwelle und Fehlerrate der Nacherhebung	61
4.5	Studie II: Reaktionszeiten korrekter und inkorrektter Antworten fMRT	62
4.6	Studie II: aktivierte Hirnregionen: verzögerte RM (600 ms) vs. sofortige RM . . .	63
4.7	Studie II: aktivierte Hirnregionen: verzögerte RM (400 ms) vs. sofortige RM . . .	64
4.8	Studie II: Vergleich des BOLD-Verlaufs junger und älterer Probanden im Kontrast verzögerter und sofortiger Rückmeldungen	66
4.9	Studie II: aktivierte Hirnregionen: inkorrekte RM vs korrekte RM	67
4.10	Studie II: Vergleich des BOLD-Verlaufs junger und älterer Probanden im Kontrast korrekter und inkorrektter Antworten	68
5.1	Studie III (Kontrollexperiment 1): verzögerte RM vs sofortige RM	82
5.2	Studie III (Kontrollexperiment 2): verzögerte RM vs sofortige RM und ausbleibende RM vs sofortige RM	83
6.1	Studie IV: Reaktionszeiten, Dauer und Intensität korrekter und inkorrektter Antworten	92
6.2	Studie IV: Statistik wiederholter Tastendrucke	93
6.3	Studie IV: Reaktionszeiten, Dauer und Intensität nach verzögerten Rückmeldungen	94
B.1	Studie II: aktivierte Hirnregionen: verzögerte RM vs sofortige RM - junge Probanden	111
B.2	Studie II: aktivierte Hirnregionen: verzögerte RM vs sofortige RM - ältere Probanden	112
B.3	Studie II: aktivierte Hirnregionen: junge Probanden, die Verzögerungen während des fMRT Experiments nicht wahrgenommen haben	113
B.4	Studie II: aktivierte Hirnregionen: ältere Probanden, die Verzögerungen während des fMRT Experiments nicht wahrgenommen haben	113

Literaturverzeichnis

- Abler, B., Walter, H. & Erk, S. (2005). Neural correlates of frustration. *NeuroReport*, 16(7), 669–672.
- Adler, F. H. & Moses, R. A. (1981). *Adler's Physiology of the eye clinical application*. St. Louis: C.V. Mosby Co.
- Arrighi, R., Lunardi, R. & Burr, D. (2011). Vision and audition do not share attentional resources in sustained tasks. *Frontiers in Psychology*, 2(56).
- Barber, R. E. & Lucas, H. C., Jr. (1983). System response time operator productivity, and job satisfaction. *Commun. ACM*, 26(11), 972–986.
- Barry, R. J., MacDonald, B., De Blasio, F. M. & Steiner, G. (2013). Linking components of event-related potentials and autonomic measures of the orienting reflex. *International Journal of Psychophysiology*, 89(3), 366 – 373.
- Bauer, L., Cranor, L. F., Reiter, M. K. & Vaniea, K. (2007). Lessons learned from the deployment of a smartphone-based access-control system. In: *Proceedings of the 3rd symposium on Usable privacy and security*, SOUPS '07, S. 64–75. New York, NY, USA: ACM.
- Baumgart, F., Kaulisch, T., Tempelmann, C., Gaschler-Markefski, B., Tegeler, C., Schindler, F., Stiller, D. & Scheich, H. (1998). Electrodynamics headphones and woofers for application in magnetic resonance imaging scanners. *Medical Physics*, 25(10), 2068–2070.
- Beattie, G. W., Cutler, A. & Pearson, M. (1982). Why is Mrs Thatcher interrupted so often? *Nature*, 300, 744–747.
- Behne, N., Scheich, H. & Brechmann, A. (2008). The left dorsal striatum is involved in the processing of neutral feedback. *Neuroreport*, 19(15), 1497–1500.
- Ben-Shakhar, G. (1994). The roles of stimulus novelty and significance in determining the electrodermal orienting response: Interactive versus additive approaches. *Psychophysiology*, 31, 402–411.
- Bernstein, A. S. (1969). To what does the orienting response respond? *Psychophysiology*, 6(3), 338–350.
- Bledowski, C., Prvulovic, D., Hoechstetter, K., Scherg, M., Wibral, M., Goebel, R. & Linden, D. E. J. (2004). Localizing p300 generators in visual target and distractor processing: A combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of Neuroscience*, 24(42), 9353–9360.
- Bonaiuto, J. & Thórisson, K. R. (2008). Towards a neurocognitive model of turn taking in multimodal dialog. In: I. Wachsmuth, M. Lenzen & G. Knoblich (Hrsg.). *Embodied Communication in Humans and Machines*. Oxford University Press.
- Boucsein, W. (2009). Forty years of research on system response times - what did we learn from it? In: C. M. Schlick (Hrsg.). *Industrial Engineering and Ergonomics*, S. 575–593. Springer Berlin Heidelberg.

- Boucein, W., Greif, S. & Wittekamp, J. (1984). Systemresponsezeiten als belastungsfaktor bei bildschirm-dialogtätigkeiten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38, 113–122.
- Brass, M. & Haggard, P. (2007). To do or not to do: The neural signature of self-control. *The Journal of Neuroscience*, 27(34), 9141–9145.
- Brechmann, A. & Scheich, H. (2005). Hemispheric shifts of sound representation in auditory cortex with conceptual listening. *Cerebral Cortex*, 15(5), 578–587.
- Brown, J. W. & Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307(5712), 1118–1121.
- Brown, S. D. & Heathcote, A. (2008). The simplest complete model of choice response time: Linear ballistic accumulation. *Cognitive Psychology*, 57(3), 153 – 178.
- Bushara, K. O., Grafman, J. & Hallett, M. (2001). Neural correlates of auditory-visual stimulus onset asynchrony detection. *The Journal of Neuroscience*, 21(1), 300–304.
- Busse, L. & Woldorff, M. G. (2003). The {ERP} omitted stimulus response to "no-stim" events and its implications for fast-rate event-related fmri designs. *NeuroImage*, 18(4), 856 – 864.
- Calvert, G. A. (2001). Crossmodal processing in the human brain: Insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 11(12), 1110–1123.
- Carbonell, J. R., Elkind, J. I. & Nickerson, R. S. (1968). On the psychological importance of time in a time sharing system¹². *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 10(2), 135–142.
- Card, S. K., Newell, A. & Moran, T. P. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc.
- Cauda, F., D'Agata, F., Sacco, K., Duca, S., Geminiani, G. & Vercelli, A. (2011). Functional connectivity of the insula in the resting brain. *NeuroImage*, 55(1), 8 – 23.
- Cauda, F., Geminiani, G., D'Agata, F., Sacco, K., Duca, S., Bagshaw, A. P. & Cavanna, A. E. (2010). Functional connectivity of the posteromedial cortex. *PLoS ONE*, 5(9), e13107.
- Clark, H. H. (1996). *Using Language*. Cambridge University Press.
- Clark, H. H. & Brennan, S. E. (1991). *Perspectives on Socially Shared Cognition*, chap. Grounding in communication, S. 127–149. 1. Washington: Amer Psychological Assn.
- Corbetta, M., Patel, G. & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: From environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306–324.
- Craig, A. (2009). How do you feel—now? the anterior insula and human awareness. *Nat Rev Neurosci*, 10(1), 59–70.
- Dabrowski, J. & Munson, E. V. (2011). 40 years of searching for the best computer system response time. *Interacting with Computers*, 23(5), 555–564.
- Daniel, R. & Pollmann, S. (2012). Striatal activations signal prediction errors on confidence in the absence of external feedback. *NeuroImage*, 59(4), 3457 – 3467.
- Deen, B., Pitskel, N. B. & Pelphrey, K. A. (2011). Three systems of insular functional connectivity identified with cluster analysis. *Cerebral Cortex*, 21(7), 1498–1506.

- Delgado, M. R. (2007). Reward-related responses in the human striatum. *Ann N Y Acad Sci*, 1104, 70–88.
- Delhees, K. (1994). *Soziale Kommunikation Psychologische Grundlagen für das Miteinander in der modernen Gesellschaft*. Westdeutscher Verlag.
- Devue, C., Collette, F., Baeteau, E., Degueldre, C., Luxen, A., Maquet, P. & Brédart, S. (2007). Here i am: The cortical correlates of visual self-recognition. *Brain Research*, 1143(0), 169 – 182.
- Dosenbach, N. U., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L. & Petersen, S. E. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends Cogn Sci*, 12(3), 99–105.
- Dosenbach, N. U., Visscher, K. M., Palmer, E. D., Miezin, F. M., Wenger, K. K., Kang, H. C., Burgund, E. D., Grimes, A. L., Schlaggar, B. L. & Petersen, S. E. (2006). A core system for the implementation of task sets. *Neuron*, 50(5), 799–812.
- Dosenbach, N. U. F., Fair, D. A., Miezin, F. M., Cohen, A. L., Wenger, K. K., Dosenbach, R. A. T., Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Raichle, M. E., Schlaggar, B. L. & Petersen, S. E. (2007). Distinct brain networks for adaptive and stable task control in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(26), 11073–11078.
- Driver, J. & Noesselt, T. (2008). Multisensory interplay reveals crossmodal influences on sensory-specific brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*, 57(1), 11–23.
- Eckert, M. A., Menon, V., Walczak, A., Ahlstrom, J., Denslow, S., Horwitz, A. & Dubno, J. R. (2009). At the heart of the ventral attention system: The right anterior insula. *Human Brain Mapping*, 30(8), 2530–2541.
- Epp, C., Lippold, M. & Mandryk, R. L. (2011). Identifying emotional states using keystroke dynamics. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, S. 715–724. New York, NY, USA: ACM.
- Esteban, A., Traba, A. & Prieto, J. (2004). Eyelid movements in health and disease. the supranuclear impairment of the palpebral motility. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 34(1), 3 – 15.
- Faro, S. H. & Mohammed, F. B. (Hrsg.) (2006). *Functional MRI Basic principles and clinical applications*. Springer.
- Forster, S. E. & Brown, J. W. (2011). Medial prefrontal cortex predicts and evaluates the timing of action outcomes. *NeuroImage*, 55(1), 253 – 265.
- Garraux, G., Salmon, E., Degueldre, C., Lemaire, C., Laureys, S. & Franck, G. (1999). Comparison of impaired subcortico-frontal metabolic networks in normal aging, subcortico-frontal dementia, and cortical frontal dementia. *NeuroImage*, 10(2), 149 – 162.
- Glier, M. (2005). *Systemantwortzeiten als Aspekt der Software-Ergonomie und der Wirtschaftsinformatik*. Master's thesis, Universität Hamburg Fachbereich Informatik.
- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z. & Kanwisher, N. (2001). The lateral occipital complex and its role in object recognition. *Vision Research*, 41, 1409 – 1422.
- Grill-Spector, K. & Malach, R. (2004). The human visual cortex. *Annu. Rev. Neurosci*, 27, 649–77.

- Gusnard, D. A. & Raichle, M. E. (2001). Searching for a baseline: Functional imaging and the resting human brain. *Nat Rev Neurosci*, 2(10), 685–694.
- Habas, C. & Cabanis, E. (2007). Cortical projection to the human red nucleus: complementary results with probabilistic tractography at 3 t. *Neuroradiology*, 49, 777–784.
- Haggard, P., Clark, S. & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nat Neurosci*, 5, 382 – 385.
- Heeger, D. J. & Ress, D. (2002). What does fmri tell us about neuronal activity? *Nat Rev Neurosci*, 3(2), 142–151.
- Heron, J., Hanson, J. V. M. & Whitaker, D. (2009). Effect before cause: Supramodal recalibration of sensorimotor timing. *PLoS ONE*, 4(11), 7681.
- Hirono, N., Mori, E., Ishii, K., Ikejiri, Y., Imamura, T., Shimomura, T., Hashimoto, M., Yamashita, H. & Sasaki, M. (1998). Hypofunction in the posterior cingulate gyrus correlates with disorientation for time and place in alzheimer's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 64(4), 552–554.
- Hirvenkari, L., Ruusuvoori, J., Saarinen, V.-M., Kivioja, M., Peräkylä, A. & Hari, R. (2013). Influence of turn-taking in a two-person conversation on the gaze of a viewer. *PLoS ONE*, 8(8), e71569.
- Holling, H. (1989). *Psychische Beanspruchung durch Wartezeiten in der Mensch-Computer Interaktion*. Lehr und Forschungstexte Psychologie 31 D. Albert, K. Pawlik, K.-H. Stapf und W. Stroebe, Springer-Verlag.
- Holroyd, C. B. & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109(4), 679–709.
- Holroyd, C. B., Hajcak, G. & Larsen, J. T. (2006). The good, the bad and the neutral: Electrophysiological responses to feedback stimuli. *Brain Research*, 1105(1), 93 – 101.
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Nystrom, L., Mars, R. B., Coles, M. G. H. & Cohen, J. D. (2004). Dorsal anterior cingulate cortex shows fmri response to internal and external error signals. *Nat Neurosci*, 7, 497–498.
- Huttenlocher, P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex - developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, 163(2), 195 – 205.
- Jessup, R. K., Busemeyer, J. R. & Brown, J. W. (2010). Error effects in anterior cingulate cortex reverse when error likelihood is high. *The Journal of Neuroscience*, 30(9), 3467–3472.
- Jezzard, P., Matthews, P. & Smith, S. (Hrsg.) (2001). *Functional MRI an introduction to methods*. Oxford University Press.
- Joyce, R. & Gupta, G. (1990). Identity authentication based on keystroke latencies. *Commun. ACM*, 33(2), 168–176.
- Jurafsky, D. & Martin, J. H. (2008). *Speech and language processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition*. London: Pentrice Hall Series in Artificial Intelligence.
- Kable, J. W. & Glimcher, P. W. (2007). The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nat Neurosci*, 10(12), 1625–1633.

- Kanowski, M., Rieger, J. W., Noesselt, T., Tempelmann, C. & Hinrichs, H. (2007). Endoscopic eye tracking system for fmri. *Journal of Neuroscience Methods*, 160(1), 10 – 15.
- Kanwisher, N. & Wojciulik, E. (2000). Visual attention: Insights from brain imaging. *Nat Rev Neurosci*, 1(2), 91–100.
- Karnan, M., Akila, M. & Krishnaraj, N. (2011). Biometric personal authentication using keystroke dynamics: A review. *Applied Soft Computing*, 11(2), 1565 – 1573.
- Keetels, M. & Vroomen, J. (2012). Exposure to delayed visual feedback of the hand changes motor-sensory synchrony perception. *Experimental Brain Research*, 219(4), 431–440.
- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald III, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A. & Carter, S., Cameron (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303, 1023–1026.
- Killeen, P. R. & Weiss, N. A. (1987). Optimal timing and the weber function. *Psychological Review*, 94(4), 455 – 468.
- Klein, T. A., Ullsperger, M. & Danielmeier, C. (2013). Error awareness and the insula: links to neurological and psychiatric diseases. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(14).
- Knutson, B. & Cooper, J. C. (2005). Functional magnetic resonance imaging of reward prediction. *Curr Opin Neurol*, 18(4), 411–7.
- Kohlisch, O. & Kuhmann, W. (1997). System response time and readiness for task execution the optimum duration of inter-task delays. *Ergonomics*, 40(3), 265–280.
- Kohrs, C., Angenstein, N., Scheich, H. & Brechmann, A. (2012). Human striatum is differentially activated by delayed, omitted, and immediate registering feedback. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6.
- Kohrs, C., Hrabal, D., Angenstein, N. & Brechmann, A. (2014). Delayed system response times affect immediate physiology and the dynamics of subsequent button press behavior. *Psychophysiology*, S. n/a–n/a.
- Kong, J., White, N. S., Kwong, K. K., Vangel, M. G., Rosman, I. S., Gracely, R. H. & Gollub, R. L. (2006). Using fmri to dissociate sensory encoding from cognitive evaluation of heat pain intensity. *Human Brain Mapping*, 27(9), 715–721.
- Kong, J., Zhang, W., Yu, N. & Xia, X. (2011). Design of human-centric adaptive multimodal interfaces. *International Journal of Human-Computer Studies*, 69(12), 854 – 869.
- Kuhmann, W., Boucsein, W., Schaefer, F. & Alexander, J. (1987). Experimental investigation of psychophysiological stress-reactions induced by different system response times in human-computer interaction. *Ergonomics*, 30(6), 933–943.
- Kurth, F., Zilles, K., Fox, P., Laird, A. & Eickhoff, S. (2010). A link between the systems: functional differentiation and integration within the human insula revealed by meta-analysis. *Brain Structure and Function*, 214, 519–534.
- Leberknight, C., Widmeyer, G. & Recce, M. (2008). An investigation into the efficacy of keystroke analysis for perimeter defense and facility access. In: *Technologies for Homeland Security, 2008 IEEE Conference on*, S. 345–350.

- Limongi, R., Sutherland, S. C., Zhu, J., Young, M. E. & Habib, R. (2013). Temporal prediction errors modulate cingulate-insular coupling. *NeuroImage*, 71(0), 147 – 157.
- Logan, J. M., Sanders, A. L., Snyder, A. Z., Morris, J. C. & Buckner, R. L. (2002). Under-recruitment and nonselective recruitment: Dissociable neural mechanisms associated with aging. *Neuron*, 33(5), 827 – 840.
- MacKenzie, I. S. & Ware, C. (1993). Lag as a determinant of human performance in interactive systems. In: *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 conference on Human factors in computing systems*, CHI '93, S. 488–493. New York, NY, USA: ACM.
- Maddock, R., Garrett, A. & Buonocore, M. (2001). Remembering familiar people: the posterior cingulate cortex and autobiographical memory retrieval. *Neuroscience*, 104(3), 667 – 676.
- Maddock, R. J., Garrett, A. S. & Buonocore, M. H. (2003). Posterior cingulate cortex activation by emotional words: fmri evidence from a valence decision task. *Human Brain Mapping*, 18(1), 30–41.
- Mandler, G. (1964). The interruption of behavior. In: *Nebraska Symposium on Motivation*, v. 12. Levine, D.
- Martin, J. (1973). *Design of man-computer dialogues*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Massey, F. J. (1951). The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46, 68–78.
- Mather, M. (2010). Aging and cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(3), 346–362.
- McCoy, A. N. & Platt, M. L. (2005). Risk-sensitive neurons in macaque posterior cingulate cortex. *Nat Neurosci*, 8(9), 1220–1227.
- McKiernan, K. A., D'Angelo, B. R., Kaufman, J. N. & Binder, J. R. (2006). Interrupting the "stream of consciousness": An fmri investigation. *NeuroImage*, 29(4), 1185 – 1191.
- McKiernan, K. A., Kaufman, J. N., Kucera-Thompson, J. & Binder, J. R. (2003). A parametric manipulation of factors affecting task-induced deactivation in functional neuroimaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(3), 394–408.
- MIL-STD (1999). Design criteria standard: Human engineering.
URL <http://www.public.navy.mil/navsafecen/Documents/acquisition/MILSTD1472F.pdf>
- Miller, R. B. (1968). Response time in man-computer conversational transactions. In: *AFIPS Conference Proceedings*, S. 267–277. Washington: Thompson Book Company.
- Minoshima, S., Giordani, B., Berent, S., Frey, K. A., Foster, N. L. & Kuhl, D. E. (1997). Metabolic reduction in the posterior cingulate cortex in very early alzheimer's disease. *Annals of Neurology*, 42(1), 85–94.
- Moeller, J. R., Ishikawa, T., Dhawan, V., Spetsieris, P., Mandel, F., Alexander, G. E., Grady, C., Pietrini, P. & Eidelberg, D. (1996). The metabolic topography of normal aging. *J Cereb Blood Flow Metab*, 16, 385–397.
- Monat, A., Averill, J. R. & Lazarus, R. S. (1972). Anticipatory stress and coping reactions under various conditions of uncertainty. *Journal of Personality and Social Psychology*, 24(2), 237 – 253.

- Nah, F. (2004). A study on tolerable waiting time: how long are web users willing to wait? *Behaviour and Information Technology*, 23 (3), 153 – 163.
- Naumann, H. (2007). *Germany Patent No. IPC G08C 23/06 (2006,01) Optical waveguide circuit.*
- Nickerson, R. S., Elkind, J. I. & Carbonell, J. R. (1968). Human factors and the design of time sharing computer systems1. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 10(2), 127–133.
- Nieuwenhuis, S., Heslenfeld, D. J., von Geusau, N. J. A., Mars, R. B., Holroyd, C. B. & Yeung, N. (2005a). Activity in human reward-sensitive brain areas is strongly context dependent. *NeuroImage*, 25(4), 1302 – 1309.
- Nieuwenhuis, S., Slagter, H. A., von Geusau, N. J., Heslenfeld, D. J. & Holroyd, C. B. (2005b). Knowing good from bad: differential activation of human cortical areas by positive and negative outcomes. *Eur J Neurosci*, 21(11), 3161–8.
- Nioche, C., Cabanis, E. & Habas, C. (2009). Functional connectivity of the human red nucleus in the brain resting state at 3t. *American Journal of Neuroradiology*, 30(2), 396–403.
- O'Doherty, J. P. (2004). Reward representations and reward-related learning in the human brain: insights from neuroimaging. *Curr Opin Neurobiol*, 14(6), 769–76.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113.
- Olson, C. R. & Musil, S. Y. (1992). Topographic organization of cortical and subcortical projections to posterior cingulate cortex in the cat: Evidence for somatic, ocular, and complex subregions. *The Journal of Comparative Neurology*, 324(2), 237–260.
- Pavlov, I. P. (1927). *Condition reflex.*. Oxford, England: Clarendon Press.
- Pearson, J. M., Heilbronner, S. R., Barack, D. L., Hayden, B. Y. & Platt, M. L. (2011). Posterior cingulate cortex: adapting behavior to a changing world. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(4), 143 – 151.
- Pérez-Quñones, M. A. & Sibert, J. L. (1996). A collaborative model of feedback in human-computer interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '96, S. 316–323. New York, NY, USA: ACM.
- Perrin, X., Chavarriaga, R., Ray, C., Siegwart, R. & Millan, J. d. R. (2008). A Comparative Psychophysical and EEG Study of Different Feedback Modalities for HRI. In: *Human-Robot Interaction (HRI), 2008 3rd ACM/IEEE International Conference on*, S. 41–48. IDIAP.
- Polich, J. (2007). Updating p300: An integrative theory of p3a and p3b. *Clin Neurophysiol*, 118(10), 2128–2148.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A. & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 676–682.
- Ratcliff, R. & Smith, P. L. (2004). A comparison of sequential sampling models for two-choice reaction time. *Psychological Review*, 111(2), 333–367.
- Renaud, K. & Cooper, R. (2000). Feedback in human-computer interaction - characteristics and recommendations. *South African Computer Journal*, 26, 105–114.

- Rushworth, M., Johansen-Berg, H., GÃ¶bel, S. & Devlin, J. (2003). The left parietal and premotor cortices: motor attention and selection. *Neuroimage*, 20 Suppl 1, 89–100.
- Rushworth, M., Walton, M., Kennerley, S. & Bannerman, D. (2004). Action sets and decisions in the medial frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8(9), 410–417.
- Sacks, H., Schegloff, E. A. & Jefferson, G. (1974). A simplest systematics for the organization of turn-taking for conversation. *Language*, 50, 696–735.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403–428.
- Savoy, R. L. (2001). History and future directions of human brain mapping and functional neuroimaging. *Acta Psychologica*, 107(107), 9 – 42.
- Schachter, S. & Singer, J. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, 69(5), 379–399.
- Schaefer, F. & Kohlisch, O. (1995). The effect of anticipatory mismatch in work flow on task performance and event related brain potentials. In: A. Grieco, G. Molteni, E. Occhipinti & B. Piccoli (Hrsg.). *Work with display units 94*, S. 241–245. North-Holland, Amsterdam.
- Scheffers, M. K. & Coles, M. G. H. (2000). Performance monitoring in a confusing world: Error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(1), 141–151.
- Schüssel, F., Honold, F. & Weber, M. (2012). Influencing factors on multimodal interaction during selection tasks. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 6.
- Scott, S. K., McGettigan, C. & Eisner, F. (2009). A little more conversation, a little less action - candidate roles for the motor cortex in speech perception. *Nat Rev Neurosci*, 10, 295–302.
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L. & Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *The Journal of Neuroscience*, 27(9), 2349–2356.
- Seow, C., S. (2008). *Designing and Engineering Time: The Psychology of Time Perception in Software*. Addison-Wesley.
- Shneiderman, B. (1984). Response time and display rate in human performance with computers. *ACM Comput. Surv.*, 16, 265–285.
- Shneiderman, B. & Plaisant, C. (2005). Quality of services. In: *Designing the user interface - Strategies for effective human-computer interaction*, S. 453–475. Boston, San Francisco, New York, London: Pearson Addison Wesley, 4 ed.
- Sikes, R. W., Vogt, B. A. & Swadlow, H. A. (1988). Neuronal responses in rabbit cingulate cortex linked to quick-phase eye movements during nystagmus. *Journal of Neurophysiology*, 59(3), 922–936.
- Smith, S. L. & Mosier, J. N. (1986). Guidelines for designing user interface software: Esd-tr-86-278.
- Snyder, A. Z. & Raichle, M. E. (2012). A brief history of the resting state: The washington university perspective. *NeuroImage*, 62(2), 902 – 910.

- Sokolov, E. N. (1963). Higher nervous functions: The orienting reflex. *Annual Review of Physiology*, 25(1), 545–580.
- Stivers, T., Enfield, N. J., Brown, P., Englert, C., Hayashi, M., Heinemann, T., Hoymann, G., Rossano, F., de Ruiter, J. P., Yoon, K. & Levinson, S. C. (2009). Universals and cultural variation in turn-taking in conversation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10587–10592.
- Szameitat, A. J., Rummel, J., Szameitat, D. & Sterr, A. (2009). Behavioral and emotional consequences of brief delays in humane-computer interaction. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(7), 561 – 570.
- TAFIM (1996). Technical architecture framework for information management.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-planar Steriotaxic Atlas of the Human Brain..* New York: Thieme.
- Thadhani, A. J. (1984). Factors affecting programmer productivity during application development. *IBM Systems Journal*, 23(1), 19–35.
- Thum, M., Boucsein, W., Kuhmann, W. & Ray, W. J. (1995). Standardized task strain and system response times in human-computer interaction. *Ergonomics*, 38(7), 1342–1351.
- Verhaeghen, P. & Cerella, J. (2002). Aging, executive control, and attention: a review of meta-analyses. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(7), 849 – 857.
- Vogt, B. A., Finch, D. M. & Olson, C. R. (1992). Functional heterogeneity in cingulate cortex: The anterior executive and posterior evaluative regions. *Cerebral Cortex*, 2(6), 435–443.
- Weis, T., Puschmann, S., Brechmann, A. & Thiel, C. M. (2013). Positive and negative reinforcement activate human auditory cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(842).
- Weishaupt, D., Köchli, V. & Marincek, B. (2009). *Wie funktioniert MRI? Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung.* Springer, third edition ed.
- Weissman, D. H., Roberts, K. C., Visscher, K. M. & Woldorff, M. G. (2006). The neural bases of momentary lapses in attention. *Nat Neurosci*, 9, 971–978.
- Williges, R. C. & Williges, B. H. (1982). Modeling the human operator in computer-based data entry. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 24(3), 285–299.
- Wilson, M. & Wilson, T. (2005). An oscillator model of the timing of turn-taking. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 957–968.
- Wilson, T. P. & Zimmerman, D. H. (1986). The structure of silence between turns in two-party conversation. *Discourse Processes*, 9(4), 375–390.
- Wittmann, M. (2009). The inner experience of time. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1955–1967.
- Wolfram, A. (2007). *Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prototypen: Optoelektronische, druckdynamische Response-Einheit..* Master's thesis, Hochschule Magdeburg Stendal.
- Zacks, J. M., Speer, N. K., Swallow, K. M., Braver, T. S. & Reynolds, J. R. (2007). Event perception: A mind/brain perspective. *Psychological Bulletin*, 133, 273–293.

Kernspintomographische Untersuchung zur Bedeutung von Rückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion

The improvement of human-computer interaction is a continual aim in computer science and software ergonomics. A successful interaction depends on several parameters. One such parameter is the design of the system's feedback, which is essential for a user as it contains the information that the system has registered their input as well as information about the system's processing status. Parameters like the information content and especially the timing of feedback affect the behavior of a user.

The present dissertation chose a neuroscientific approach and employed functional magnetic resonance imaging to identify neuronal correlates of a successful interaction and investigate the effects of delayed system responses on brain activity. In all four studies presented in the empirical part of this dissertation a basic auditory categorization task served as an interaction context for the participants, who received feedback subsequent to their button press responses. The feedback parameters systematically changed according to the respective question of interest.

The first study analyzed the impact of the feedback's information content and compared simple registering feedback with evaluative feedback. The results show that both kinds of feedback are equally sufficient to activate the striatum - a brain region known to be part of the reward system. Evaluative feedback, however, showed stronger activations in brain regions of cognitive control and attention allocation. Therefore, it can be assumed that evaluative feedback with abundant information attracts more attention and increases the involvement of the user with the interaction.

The second and third study analyzed the effects of delayed visual system responses on brain activity considering the just noticeable delay of a system response, the influence of the user's temporal expectation and the trustworthiness of a system. The following conclusions can be drawn from both studies: 1. The perception of a delay depends on the cognitive demands during the interaction and on the age of the participant. 2. Unexpected delays at (400 ms) and above this perceptual threshold (600 ms) activate a network of brain regions known to control goal-oriented actions, and the strength of this activation increases with the duration of the delay. 3. If delays occur regularly, users can adapt to them, and the brain activity in the observed network gradually diminishes over the course of the interaction. 4. The infrequent omission of an expected feedback during the interaction reduces the system's trustworthiness, which leads to an increase in brain activity not only in response to such omissions but also following regularly occurring delays. Delays thus interrupt the course of an interaction and trigger an orienting response that in turn activates brain regions of action control.

Finally, the results of the fourth study reflect the impact of delays on the user's responses. The longer a delay lasted (500 ms - 2 s), the more often participants repeated their button press and the more pressure they applied.

Finally, recommendations for cognitive technical systems are derived from the results and discussed.

Kernspintomographische Untersuchung zur Bedeutung von Rückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion

Die Optimierung der Interaktion zwischen Nutzer und System ist ein fortwährendes Ziel der Informatik und Software-Ergonomie. Viele verschiedene Parameter beeinflussen den erfolgreichen Verlauf einer Mensch-Computer-Interaktion. Ein entscheidender Faktor ist hierbei die Gestaltung der Systemrückmeldung, da diese den Nutzer darüber informiert, dass seine Eingabe registriert wurde und Informationen über den Bearbeitungsstatus des Systems zu Verfügung stellt. Der Informationsgehalt und der Zeitpunkt einer solchen Rückmeldung beeinflussen das Nutzerverhalten.

Die vorliegende Dissertation verfolgt einen neurowissenschaftlichen Ansatz und untersuchte mittels funktioneller Magnetresonanztomographie die neuronalen Korrelate eines erfolgreichen Interaktionsverlaufs und den Einfluss verzögerter Systemantworten auf die Hirnaktivität. Im empirischen Teil der Arbeit werden vier Studien vorgestellt, in denen Probanden eine einfache auditorische Kategorisierungsaufgabe lösten und nach Eingabe ihrer Antwort per Tastendruck eine Rückmeldungen vom System erhielten. Die Eigenschaften dieser Rückmeldungen wurden entsprechend der jeweiligen Fragestellung variiert.

Die erste Studie analysierte den Einfluss des Informationsgehalts einer Rückmeldung und verglich hierfür einfache registrierende mit bewertenden Rückmeldungen. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Arten der Rückmeldung das Striatum - eine Region des Belohnungssystems - gleichermaßen aktivieren. Bewertende Rückmeldungen aktivieren zudem Regionen der Aufmerksamkeitszuweisung und kognitiven Kontrolle. Dies lässt den Schluss zu, dass informationsreichere bewertende Rückmeldungen mehr Aufmerksamkeit auf sich ziehen und so den Nutzer stärker in die Interaktion einbinden.

Im zweiten und dritten Experiment wurde der Einfluss verzögerter Rückmeldungen auf die Hirnaktivität unter Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwelle für Verzögerungen, der Nutzererwartung und der Vertrauenswürdigkeit des Systems untersucht. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den Daten ableiten: 1. Die Wahrnehmung einer Verzögerung ist abhängig vom Alter der Teilnehmer und von ihrer kognitiven Beanspruchung während der Interaktion. 2. Unerwartete Verzögerungen an (400ms) und über der Wahrnehmungsschwelle (600ms) aktivieren ein Netzwerk an Hirnregionen, das an der zielgerichteten Handlungskontrolle beteiligt ist. Die Stärke dieser Aktivität steigt mit der Dauer der Verzögerung. 3. Treten Verzögerungen regelmäßig auf, gewöhnt sich der Nutzer daran und die Hirnaktivität im beobachteten Netzwerk nimmt ab. 4. Das vereinzelte Ausbleiben einer erwarteten Rückmeldung senkt das Vertrauen in das System. Dies führt dazu, dass nicht nur das Ausbleiben der Rückmeldung selbst, sondern auch regelmäßige Verzögerungen einen Anstieg der Aktivität hervorrufen. Demnach unterbrechen Verzögerungen den Interaktionsverlauf und lösen eine Orientierungsreaktion aus, die wiederum Hirnregionen der Handlungskontrolle aktiviert.

Dass auch das Nutzerverhalten durch Verzögerungen beeinflusst wird, belegen die Ergebnisse der vierten Studie. Treten Verzögerung auf (500 ms - 2 s), wiederholen Nutzer ihre Eingabe häufiger und mit mehr Nachdruck als zuvor.

Abschließend werden aus den Befunden Empfehlungen für kognitive technische Systeme abgeleitet und diskutiert.

Lebenslauf

Christin Kohrs

Geburtsdatum: 01.03.1984
Geburtsort: Beckendorf-Neindorf
Staatsangehörigkeit: deutsch

Studium

seit 10/2013 Psychologie (M. Sc.)
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

01/2009 - 10/2013 Doktorandin am Leibniz-Institut für Neurobiologie, Magdeburg
Speziallabor für Nicht-Invasive Bildgebung

09/2011 Psychologie (B. Sc.)
10/2009 - 09/2011 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

11/2008 Neurowissenschaften (Dipl.)
10/2005 - 11/2008 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

10/2003 - 09/2005 Psychologie (Vordiplom)
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Schulausbildung

2003 Abitur
1994 - 2003 Gymnasium, Oschersleben

1990 - 1994 Grundschule, Hamersleben

Magdeburg, 23. September 2014

Christin Kohrs

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit zum Thema

Kernspintomographische Untersuchung zur Bedeutung von Rückmeldungen in der Mensch-Computer-Interaktion

selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel verfasst wurde und dass die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht und vollständig angegeben wurden.

Weiterhin erkläre ich, dass ich weder diese noch eine andere Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) an anderen Einrichtungen eingereicht habe.

Magdeburg, 23. September 2014

Christin Kohrs