

Aus der Klinik für Neurologie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Neuronale Korrelate einfacher moralischer Urteilsprozesse

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Helge Schmidt

aus Braunschweig

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. A. Villringer

2. Prof. Dr. med. A. Heinz

3. Prof. Dr. med. Dr. phil. H. Walter

Datum der Promotion: 19.02.2009

Widmung

In Dankbarkeit,
meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden
gewidmet.

Zusammenfassung

Moralität bildet eine wesentliche Grundlage des menschlichen Zusammenlebens und die Erforschung ihrer neurobiologischen Grundlagen gewinnt zunehmendes Interesse im medizinischen, psychologischen und philosophischen Diskurs. In bisherigen funktionell-bildgebenden Studien zum moralischen Urteil wurden als Stimuli komplexe Dilemmata oder durch die Darbietung von Gewalt emotional stark ansprechende Szenarien verwandt. Es zeigten sich dabei Aktivierungen in einem fronto-temporalen Netzwerk. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung einfacher, nicht dilemmatischer moralischer Urteilsprozesse in einem Versuchsdesign, welches auf die Darbietung von Gewalt verzichtet (im ersten Experiment dieser Arbeit), bzw. die Untersuchung des Einflusses der Darbietung von Gewalt in den zu beurteilenden Szenarien (im zweiten Experiment). Die Untersuchungen erfolgten mit der Methode der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT). Im ersten Experiment der vorliegenden Arbeit wurde das moralische Urteil über eindeutige, nicht-dilemmatische Szenarien, welche keine direkte Körperverletzung enthielten, untersucht. Im Vergleich zum semantischen Urteilen zeigten sich Aktivierungen im linken lateralen, rechten medialen und beidseitig im ventromedialen Präfrontalkortex, im linken posterioren Sulcus temporalis superior und Gyrus temporalis medialis, beidseitig im temporalen Pol sowie im rechten Cuneus. Bis auf letztere zeigten sich alle Regionen, wenn auch mit unterschiedlicher Konsistenz, auch schon in den vorausgegangenen Studien aktiv. Die Ergebnisse zeigen somit, dass die genannten Regionen ein Netzwerk darstellen, welches sowohl an der Verarbeitung komplexer moralischer Dilemmata und emotional stark ansprechender Szenarien, als auch am Urteil über eindeutige, nicht-dilemmatische Szenarien, welche keine direkte Körperverletzung enthalten, beteiligt ist. Im zweiten Experiment der vorliegenden Arbeit wurde als zusätzlicher Faktor die direkte Körperverletzung in die zu beurteilenden Szenarien mit eingebracht. Beim Vergleich des moralischen Urteils mit dem semantischen Urteilen ließen sich Ergebnisse aus dem ersten Experiment größtenteils replizieren. Es zeigten sich beidseitig Aktivierungen im ventromedialen und rechtsseitig im medialen Präfrontalkortex, beidseitig im posterioren Sulcus temporalis superior und im temporalen Pol sowie zusätzlich eine Aktivierung im rechten posterioren Gyrus cinguli. Beim Vergleich der Bearbeitung von Szenarien, welche direkte körperliche Gewalt enthielten, mit solchen, in denen keine Körperverletzung vorlag, ergaben sich Unterschiede beidseitig im temporalen Pol, wo während der Szenarien mit Gewalt ein geringeres fMRT-Signal zu verzeichnen war. Zudem zeigte sich bei diesen Szenarien in der Analyse der Antwortzeiten

eine schnellere Antwort der Probanden. Beides weist auf einen Verarbeitungsvorteil und eine reduzierte Verarbeitungstiefe für bedrohliche Stimuli hin. Es wird hinsichtlich des geringen Effekts des Faktors „Gewaltpräsentation“ zudem die Annahme einer hohen interindividuellen Variabilität in der emotionalen Verarbeitung diskutiert, wie auch der Effekt einer Habituation sowie die Unterdrückung emotionaler Prozesse durch nicht-emotionale kognitive Beanspruchung.

Schlagworte:

Moral, Moralisches Urteilen, Ethik, Entscheidungsfindung, Soziale Kognition, Sozialverhalten, fMRT

ANMERKUNG

Im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. med. A. Villringer sind folgende Publikationen unter meiner Mitwirkung entstanden:

Heekeren, H. R., Wartenburger, I., Schmidt, H., Schwintowski, H. P. und Villringer, A. (2003).

An fMRI study of simple ethical decision-making. *Neuroreport* (Band 14), Seite: 1215-1219.

Heekeren, H. R., Wartenburger, I., Schmidt, H., Prehn, K., Schwintowski, H. P. und Villringer, A. (2005). Influence of bodily harm on neural correlates of semantic and moral decision-

making. *Neuroimage* (Band 24), Seite: 887-897.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VII
1. Einleitung	1
1.1 Aktueller Stand der Forschung.....	3
1.1.1 Läsionsstudien.....	3
1.1.2 Ergebnisse funktionell-bildgebender Untersuchungen	6
1.2 Zusammenfassung bisheriger Studienergebnisse und Entwicklung der Fragestellung	11
1.2.1 Erstes Experiment – Herleitung und Formulierung der Hypothese	13
1.2.2 Zweites Experiment – Herleitung und Formulierung der Hypothese	14
2. Material und Methoden	15
2.1 Methodik: Allgemeiner Teil.....	15
2.1.1 Funktionelle Bildgebung und Datenanalyse	15
2.1.2 Physiologische Grundlagen der fMRT.....	15
2.1.3 Das Experimentelle Design: Blockdesign und ereigniskorreliertes Design.....	17
2.1.4 Grundlagen der fMRT-Datenanalyse	19
2.2 Methodik: Spezieller Teil.....	26
2.2.1 Probanden.....	26
2.2.2 Satzmaterial.....	26
2.2.3 Verhaltensdaten: Erhebung und statistische Verarbeitung.....	30
2.2.4 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	31
2.2.5 FMRT-Datenaquisition	33
2.2.6 FMRT-Datenanalyse	35
3. Ergebnisse	37
3.1 Ergebnisse des ersten Experiments	37
3.1.1 Verhaltensdaten des ersten Experiments.....	37
3.1.2 FMRT-Daten des ersten Experiments	38
3.2 Ergebnisse des zweiten Experiments	42
3.2.1 Verhaltensdaten des zweiten Experiments.....	42
3.2.2 FMRT-Daten des zweiten Experiments	46
3.3 Zu den Hypothesen.....	55
3.3.1 Zum ersten Experiment	55
3.3.2 Zum zweiten Experiment	55

4. Diskussion	56
4.1 Diskussion der Ergebnisse des ersten Experiments	57
4.1.1 Implikationen der Verhaltensdaten des ersten Experiments	57
4.1.2 Die Untersuchung einfacher nicht-dilemmatischer moralischer Entscheidungsfindung unter Ausschluss von direkter körperlicher Gewalt im Vergleich mit vorausgegangenen fMRT-Studien zur Neurokognition der Moral.	57
4.2 Diskussion der Ergebnisse des zweiten Experiments	58
4.2.1 Implikationen der Verhaltensdaten des zweiten Experiments	58
4.2.2 Die Untersuchung einfacher nicht-dilemmatischer moralischer Entscheidungsfindung unter Präsentation von direkter körperlicher Gewalt im Vergleich mit vorausgegangenen fMRT-Studien zur Neurokognition der Moral	59
4.2.3 Der Einfluss direkter körperlicher Gewalt	60
4.3 Vergleich der Ergebnisse der beiden Experimente der vorliegenden Arbeit miteinander	63
4.4 Die Rolle der aktivierten Gehirnregionen für die moralische Kognition	64
4.4.1 Die in Studien zur Neurokognition der Moral konsistent aktivierten Regionen	64
4.4.2 Eine weitere in der vorliegenden Arbeit, nicht aber in vorausgegangenen Studien, aktivierte Region	72
4.5 Ziele und Grenzen der funktionellen Bildgebung kognitiver Funktionen und die Identifizierung eines die moralische Kognition repräsentierenden Netzwerks	73
5. Zusammenfassung	75
6. Ausblick	77
Abbildungsverzeichnis	78
Tabellenverzeichnis	80
Verzeichnis der Internetquellen:	81
Literaturverzeichnis	83

1. Einleitung

Moralität lenkt das Sozialverhalten in eine an gesellschaftliche Werte und Normen orientierte Richtung und bildet somit eine wesentliche Grundlage des menschlichen Zusammenlebens. Die Bedeutung der Erforschung der neurobiologischen Grundlagen von „Moral“ wird deutlich, wenn man sich das Interesse verschiedener Disziplinen an diesem Thema vor Augen führt.

Aus der Perspektive der Moral- und Rechtsphilosophie sowie der Moralpsychologie ist durch die neurowissenschaftliche Erforschung des moralischen Verhaltens auf lange Sicht eine Bestätigung oder Widerlegung konkurrierender Konstrukte zu erhoffen. Insbesondere geht es hierbei um die Frage, ob dem moralischen Verhalten eher eine vernunftorientierte oder eher eine emotionale und intuitive Urteilsfindung zugrunde liegt. Seit Kants „Grundlegung zur Metaphysik der Sitten“ (Kant, 1786) dominierten hier Konstrukte, die der Vernunft und bewussten Überlegungen die entscheidende Rolle in der moralischen Urteilsfindung zuschrieben. Auch die Theorien Piagets und Kohlbergs zur Entwicklung des moralischen Urteils sind stark von diesem Trend beeinflusst (Kohlberg, 1964; Piaget, 1973). Dem gegenüber stehen Theorien von Autoren, welche die Bedeutung der Emotionen besonders unterstreichen, wie z.B. David Hume in seinem „A Treatise of Human Nature“ (Hume, 1739) und Francis Hutcheson in seinem „Essay on the Nature and Conduct of the Passions with Illustrations on the Moral Sense“ (Hutcheson, 1728).

Auch in aktuellen moralpsychologischen Modellen wird die Rolle von Emotionen, besonders in Form der affektiven Intuition, in der moralischen Urteilsfindung unterstrichen. Vernunft und Emotionen werden in diesem „Social Intuitionist Model“ nicht als einander gegenüberstehende Strategien betrachtet, sondern als Teilprozesse im Gesamtprozess des Urteilens. Der letztlich entscheidende und bislang oft unterschätzte Einfluss ist hiernach meist der (vor allem durch sozialpsychologische Faktoren beeinflussten) affektiven Intuition zuzuschreiben und seltener den bewussten Überlegungen (Haidt, 2001). Die bewusste Überlegung erscheint demnach eher als post hoc Prozess nach der eigentlichen Entscheidung. Zudem deuten neuropsychologische Modelle der Entscheidungsfindung auf eine wesentliche Rolle der Emotionen in Entscheidungsprozessen hin (Damasio, 1995). Ein weiterer Ansatz behauptet, dass sowohl Emotionen als auch bewusste Überlegungen die Folge des durch unbewusste Analyseprozesse erlangten moralischen Urteils seien (Hauser, 2006).

Auch aus gesellschaftlichem Interesse ist die Erforschung der neuronalen Prozesse, die moralischem Verhalten zugrunde liegen, von großer Bedeutung. So ist bei einem beträchtlichen Anteil (etwa 50%) der männlichen Gefängnisinsassen die Diagnose einer Antisozialen

Persönlichkeitsstörung zu stellen (Fazel und Danesh, 2002). Neben den beschriebenen psychologischen, philosophischen und gesellschaftlichen Interessen an dem vorliegenden Thema erscheint es auch aus medizinischer Sicht von Bedeutung. Es ist hier an die Frontalhirnläsionen und die Antisoziale Persönlichkeitsstörung zu denken. Auch die fronto-temporale Demenz (Morbus Pick) geht mit sozialen Regelbrüchen wie Aggressivität und Distanzlosigkeit einher. Eine weitere erwähnenswerte Erkrankung aus dem neuro-psychiatrischen Gebiet ist das Tourette-Syndrom, welches mit Tics einhergeht, die zumeist einen sozialen Regelbruch darstellen (Grimassieren, Schreien, Anfassen sowie das Ausrufen anstößiger Wörter und Phrasen). Die Ergebnisse der neurowissenschaftlichen Moralforschung könnten einen Beitrag zur Aufklärung der Pathophysiologie dissozialer Symptome dieser Erkrankungen leisten.

Die Erforschung der neurobiologischen Grundlagen von „Moral“ bedarf zunächst der Auftrennung des Begriffs „Moral“ in verschiedene zu untersuchende Einzelaspekte. So ist bei der Antisozialen Persönlichkeitsstörung, wie auch bei im Erwachsenenalter erworbenen Frontalhirnläsionen die Fähigkeit zum moralischen Urteilen zwar erhalten, die Tendenz, sich dementsprechend zu verhalten, ist aber relativ gering. Das heißt, das moralische Urteil und der Antrieb, sich moralisch zu verhalten, beruhen wahrscheinlich auf zumindest teilweise unterschiedlichen neurologischen Substraten.

Ein moralisches Urteil lässt sich definieren als eine Bewertung einer Handlung oder des Charakters einer Person, unter Berücksichtigung der anerkannten Werte einer Gemeinschaft (Haidt, 2001). Das Urteil kann sich sowohl auf einfache und eindeutige Situationen als auch auf komplexe Dilemmata beziehen. Es ist möglich, dass sich mit der Komplexität der Situation auch die kognitive Strategie der Beurteilung ändert (z.B. spontan intuitiv / bewusst überlegend), und somit auch die im Experiment zu erwartende neuronale Aktivität.

1.1 Aktueller Stand der Forschung

1.1.1 Läsionsstudien

Ein erster Hinweis darauf, dass das menschliche Sozialverhalten von der Integrität lokalisierter Gehirnfunktionen abhängt, ist der Wissenschaft spätestens seit Mitte des 19. Jahrhunderts, seit dem Unfall des Eisenbahnarbeiters Phineas Gage bekannt. Bis zur Entwicklung nicht-invasiver Untersuchungsmethoden in der Neurologie waren Läsionsstudien die einzige Quelle wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns in diesem Gebiet. Der folgende Abschnitt stellt die aus den Läsionsstudien gewonnenen Erkenntnisse dar.

1.1.1.1 Historischer Hintergrund: Phineas Gage

Der Bahnarbeiter Phineas Gage überlebte 1848 einen Unfall während einer Sprengung, bei dem sein Schädel und Teile seines Frontalhirns von einer Eisenstange durchschossen wurden. Er lebte anschließend noch 13 Jahre, die Krankengeschichte wurde von J. Harlow, dem behandelnden Arzt dokumentiert (Harlow, 1848). Wie H. Damasio anhand des im Warren Medical Museum der Harvard Medical School in Boston aufbewahrtem Schädel rekonstruierte, trat die Eisenstange durch die linke Wange in den Schädel ein, durchbrach die Hinterwand der Orbita, zerstörte auf dem Weg durch das Gehirn den linken orbitofrontalen Lappen sowie einen Teil des linken Frontallappens und eventuell auch des rechten, um schließlich am Schädeldach wieder aus dem Schädel auszutreten (Damasio et al., 1994) (vgl. Abb. 1).

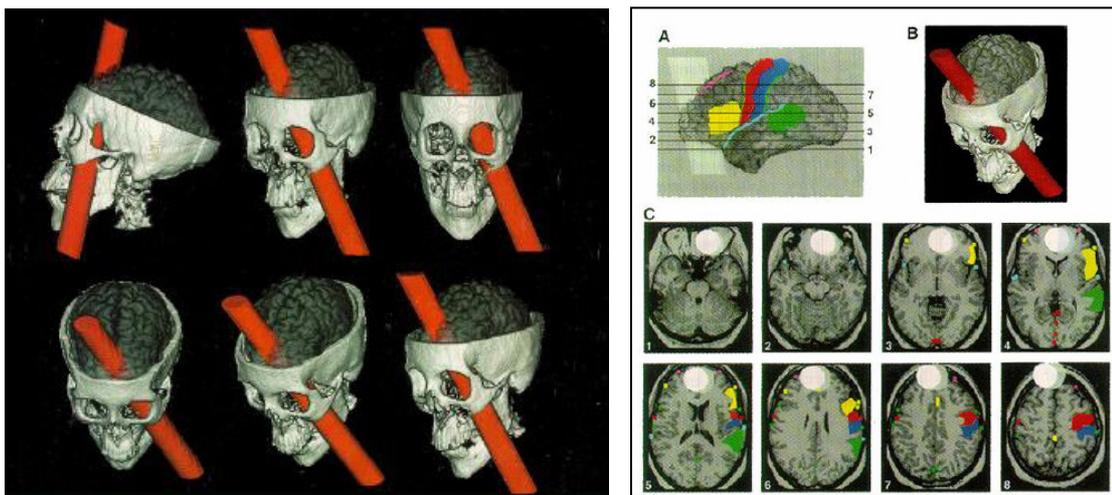


Abbildung 1: Rekonstruktion der Folgen des Unfalls von Phineas Gage (Damasio et al., 1994)

„Nach dem Unfall kümmerten ihn keine sozialen Konventionen mehr, er verstieß gegen moralische Prinzipien, traf Entscheidungen, die seinen Interessen zuwiderliefen“ (Damasio, 1995).

1.1.1.2 Frontalhirnläsionen im Erwachsenenalter und Antisoziale Persönlichkeitsstörung

Seit Phineas Gage wurden weitere Fälle beschrieben, bei denen Frontalhirnläsionen mit einer Beeinträchtigung des Sozialverhaltens einhergingen. Patienten mit im Erwachsenenalter erworbenen orbitofrontalen oder ventromedialen präfrontalen Läsionen zeigen unverantwortliches und unangemessenes Sozialverhalten, eine Verminderung ihrer sozialen und emotionalen Intelligenz (Bar-On et al., 2003), eine Beeinträchtigung komplexerer sozialer Urteile (Stone et al., 1998) und des Empathievermögens (Eslinger et al., 2002; Shamay-Tsoory et al., 2003) sowie eine Gleichgültigkeit gegenüber den Konsequenzen ihres Handelns. Demgegenüber stehen scheinbar unbeeinträchtigte grundlegende kognitive Fähigkeiten sowie das erhaltene Wissen um soziale Konventionen und moralische Regeln (Bechara et al., 1994; Eslinger und Damasio, 1985). Es kann also durchaus ein den „anerkannten Werten einer Gemeinschaft“ entsprechendes einfaches Urteil gefällt werden, die Tendenz, sich dem entsprechend zu verhalten, nimmt allerdings ab. Das klinische Bild weist somit Ähnlichkeiten mit dem der Antisozialen Persönlichkeitsstörung auf. In Übereinstimmung hiermit steht auch der Befund, dass Individuen mit einer Antisozialen Persönlichkeitsstörung ein verringertes Volumen (Raine et al., 2000) und einen veränderten Stoffwechsel (Raine et al., 1994; Raine et al., 1997; Raine et al., 1998b; Raine et al., 1998a) des präfrontalen Kortex aufweisen sowie eine Veränderung der autonomen Reaktionsmuster, was auch bei Patienten mit präfrontalen Läsionen zu beobachten ist (Blair und Cipolotti, 2000; Damasio et al., 1990; Raine et al., 2000). Allerdings scheint die Anwendung von Gewalt bei Patienten mit präfrontalen Läsionen eher impulsiv, reaktiv auf Frustration oder Drohungen zu sein, während Patienten mit einer Antisozialen Persönlichkeitsstörung sich ihrer eher als Mittel zum Zweck bedienen (Blair, 2001; Brower und Price, 2001).

1.1.1.3 Frontalhirnläsionen im frühen Kindesalter

Eine Besonderheit zeigt sich bei Frontalhirnläsionen, die im frühen Kindesalter erworben wurden.

Die Anzahl der beschriebenen Fälle ist noch relativ gering, es lassen sich jedoch Unterschiede zu den im Erwachsenenalter erworbenen Läsionen erkennen:

Die Auswirkungen der im Kindesalter erworbenen Läsionen unterscheiden sich von den im Erwachsenenalter erworbenen vor allem in einer zusätzlichen Beeinträchtigung des sozialen und moralischen *Urteilens*, wie sie bei Patienten mit im Erwachsenenalter erworbenen Läsionen nicht nachzuweisen war. Der orbitofrontale Kortex scheint demnach also zur *Aneignung des Wissens über soziale Regeln* eine besondere Rolle zu spielen (Anderson et al., 1999; Grattan und Eslinger, 1992). Auch das Ausmaß des unmoralischen Handelns ist bei Patienten mit früh erworbenen präfrontalen Läsionen größer als bei Patienten mit spät erworbenen Läsionen (Eslinger et al., 1992). Die Patienten weisen ebenfalls eine defekte autonome Reaktion auf Strafreize auf, wie es auch bei Patienten mit Antisozialer Persönlichkeitsstörung der Fall ist (Anderson et al., 1999).

Aufgrund der geringen Fallzahl der Studien über Frontalhirnläsionen im Kindesalter, sind die daraus zu ziehenden Schlüsse bezüglich der Funktionen einzelner Regionen jedoch noch mit Zurückhaltung zu betrachten.

1.1.2 Ergebnisse funktionell-bildgebender Untersuchungen

Mit funktionell-bildgebenden Verfahren kann eine Korrelation von psychischen Funktionen und neuronalen Funktionen dargestellt werden. Seit der Entwicklung dieser Verfahren sind viele neue Erkenntnisse gewonnen wurden, die dazu beitragen, die neuronalen Grundlagen von Sozialverhalten aufzuklären. Zum moralischen Urteilen liegen bisher nur wenige fMRT-Studien vor.

Greene et al. untersuchten die Entscheidung über komplexe moralische Dilemmata mit unterschiedlich emotionalem Inhalt (Greene et al., 2001). Moll et al. ließen die Probanden emotional gefärbte Sätze moralisch beurteilen (Moll et al., 2001; Moll et al., 2002a). In einer weiteren Studie von Moll et al. mussten die Probanden Bilder betrachten, in denen moralische Regelbrüche gezeigt wurden (Moll et al., 2002b).

Moralisches Urteilen über Dilemmata

Greene et al. suchten einen Unterschied in der neuronalen Verarbeitung von moralischen Dilemmata, deren Inhalt durch eine direkte (d.h. durch das handelnde Subjekt unmittelbar verursachte) körperliche Gewalt emotional stärker gefärbt war (Greene nennt diese „moralisch persönliche Dilemmata“), gegenüber Dilemmata mit nur indirekter oder keiner körperlicher Gewalt („moralisch unpersönliche Dilemmata“), bzw. ohne moralischen Bezug („nicht-moralische Dilemmata“) (Greene et al., 2001). Ein Ziel dieses Versuchsdesigns war es, die emotionale Komponente der Verarbeitung der Dilemmata darzustellen. Die Untersuchungen ergaben eine signifikant gesteigerte Aktivität des beidseitigen medialen präfrontalen Kortex (Brodmann Areal (BA) 9/10), des posterioren Gyrus cinguli (BA 31) und beidseitig im posterioren Sulcus temporalis superior (BA 39) in den „moralisch persönlichen Dilemmata“ (der stärker die Emotionen ansprechenden Bedingung) gegenüber den „moralisch unpersönlichen“ und „nicht-moralischen Dilemmata“ (vgl. Abb. 2).

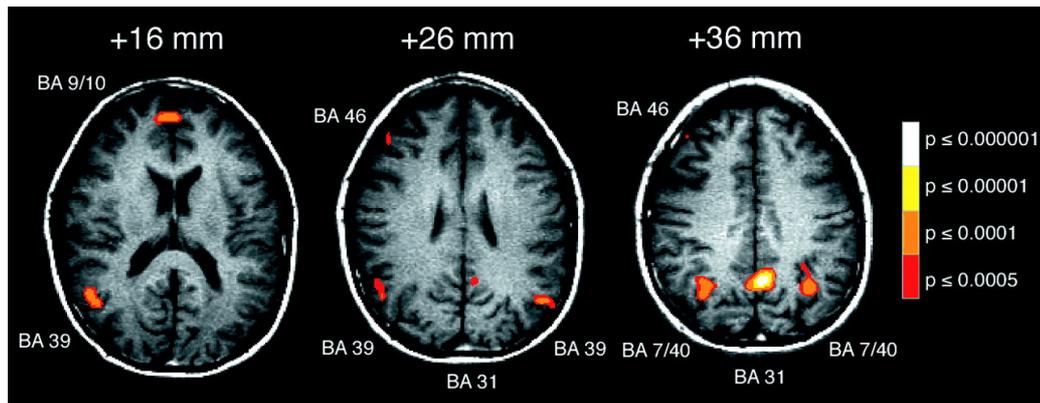


Abbildung 2: Ergebnisse der Studie von Greene et al., 01. In der Abbildung sind die Regionen BA 9/10, BA 39 und BA 31 durch einen *stärkeren* Anstieg des fMRT-Signals in den „persönlichen Dilemmata“ gegenüber den anderen („moralisch unpersönlichen“ und „nicht-moralischen“) Dilemmata gekennzeichnet, die Regionen BA 46 und BA 7/40 durch eine *geringere* fMRT-Antwort in dieser Bedingung gegenüber den anderen beiden. Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach weiß zunehmend).

Eine weitere Analyse bestand in dem Vergleich von „moralisch unpersönlichen Dilemmata“ zu „nicht-moralischen Dilemmata“. Hier zeigten sich Aktivierungen beidseitig im medialen präfrontalen Kortex (PFC, BA 9/10) und im posterioren Gyrus cinguli (BA 31). Im Vergleich zu den emotionalen persönlichen Dilemmata fehlte also die Aktivierung im posterioren Sulcus temporalis. Die Verwendung von Dilemmata beschreibt jedoch nur einen speziellen, im Alltag eher selteneren Fall des moralischen Urteilens. Zudem enthielten die Dilemmata (besonders die „moralisch persönlichen Dilemmata“) meistens eine als sicher anzunehmende Behauptung über die Konsequenzen der fragten Handlung, wie sie in der Realität nicht gegeben ist.

Moralisches Urteilen über auditiv dargebotene Sätze

Moll et al. untersuchten den Unterschied der neuronalen Verarbeitung emotional gefärbter moralischer Urteile gegenüber der Verarbeitung unemotionaler, auf Fakten bezogener Urteile (Moll et al., 2001). Die Stimuli bildeten hierbei auditiv im Blockdesign (siehe hierzu Kap. 2.1.3) präsentierte Aussagen, welche in Bezug auf ihre moralische oder faktische Richtigkeit beurteilt werden sollten (z.B.: „Sie erhängten einen Unschuldigen.“ oder „Telefone klingen nie.“). Es zeigten sich beim „Moralischen Urteilen“ im Vergleich zum „Urteilen über Fakten“ Aktivierungen beidseitig im frontopolaren Kortex (BA 10/46), beidseitig im medialen präfrontalen Kortex (BA 9/10), rechts im anterioren Temporallappen (BA 38) und im Sulcus temporalis superior, links im Präcuneus (BA 7), im linken Nucleus lenticularis sowie im rechten Cerebellum (vgl. Abb. 3).

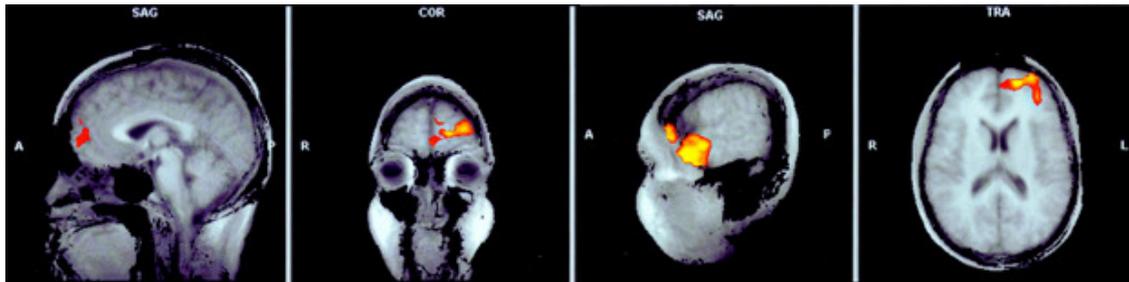


Abbildung 3: Regionen mit einem stärkeren fMRT-Signal während Moralischem Urteilen gegenüber dem Urteilen über Fakten (Moll et al., 01). Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach weiß zunehmend).

Es blieb dabei aber unklar, welche Aktivierungen eher durch rationale Prozesse während des moralischen Urteilens, oder eher durch die begleitenden Emotionen verursacht sind. Es folgte daher eine Analyse, in welcher eine emotionale Bewertung der Sätze als Kovariate in die Analyse integriert wurde, um somit das moralische Urteilen unabhängig von der emotionalen Bewertung untersuchen zu können. Hiernach zeigten sich Aktivierungen im linken frontopolaren Kortex (BA 10/46), rechts im medialen präfrontalen Kortex (BA 9/10), rechts im anterioren Temporallappen (BA 38) und links im Präcuneus (BA 7) sowie im rechten Cerebellum (siehe Abb. 4). Die Einführung der Emotionalität als Kovariate führte also zum Wegfall der Aktivierungen im posterioren Sulcus temporalis superior und im Nucleus lenticularis (vgl. Abb. 4). (Vgl. bei Greene et al.: Der Vergleich unpersönlicher mit nicht-moralischen Dilemmata zeigt gegenüber dem Vergleich persönlicher mit nicht-moralischen Dilemmata ebenfalls keine Aktivität im posterioren Sulcus temporalis superior.)

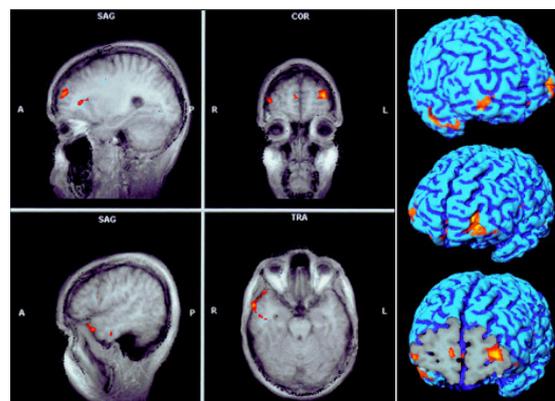


Abbildung 4: fMRT-Signal während moralischem Urteilen gegenüber dem Urteilen über Fakten nach Einführung der emotionalen Bewertung als Kovariate (Moll et al., 01). Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach weiß zunehmend).

Moralisches Urteilen über visuell dargebotene Sätze

Eine andere Studie von Moll et al. verglich das „Urteilen über visuell dargebotene Sätze moralischen Inhalts“ mit dem „Urteilen über moralisch-neutrale Sätze“ (z.B.: „Das Gericht verurteilte einen Unschuldigen.“ und „Der Maler benutzt seine Hand als Pinsel.“). Dabei stellten sich Aktivierungen in der linken Hemisphäre im medialen orbitofrontalen Kortex (Gyrus rectus, BA 10/11), im Temporalpol (BA 38) sowie im posterioren Sulcus temporalis superior (STS, BA 21/22) (Moll et al., 2002a) dar (vgl. Abb. 5).

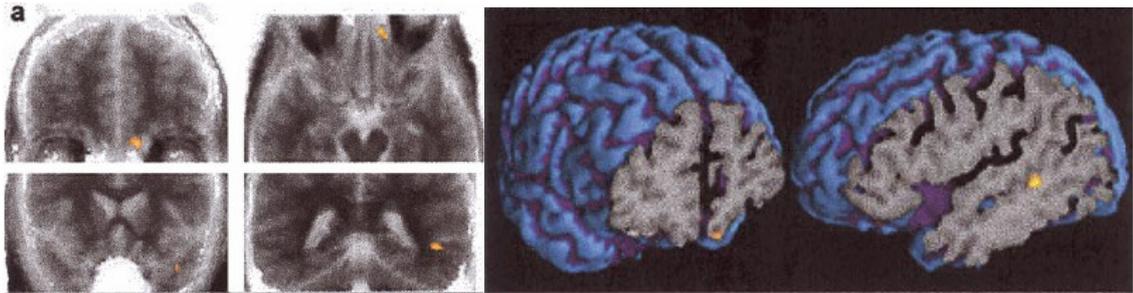


Abbildung 5: fMRT-Signal während Moralischem Urteilen gegenüber moralisch-neutralem Urteilen (Moll et al., 02a). Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach weiß zunehmend).

Auch in diesem Vergleich blieb fraglich, welche Aktivierungen auf die unangenehmen Emotionen zurückführbar waren. Daher folgte ein Vergleich der moralischen Bedingung gegenüber Sätzen, die unangenehme Emotionen auslösen, aber keine moralischen Themen betreffen, um so für den Anteil der unangenehmen Emotionen in der moralischen Bedingung zu kontrollieren. Dabei zeigten sich Aktivierungen im medialen orbitofrontalen Kortex und posterioren Sulcus temporalis superior, aber keine im Temporalpol.

Anschauen visuell dargebotener Szenen mit Moral-bezogenem Inhalt

In einer weiteren Studie untersuchten Moll et al., welche Regionen bei der passiven Betrachtung von visuell dargebotenen Szenen, die moralische Emotionen hervorrufen, aktiv sind. Hiermit sind Emotionen gemeint, die an das Wohl der Gemeinschaft oder einzelner Personen gebunden sind, und beispielsweise durch das Brechen moralischer Regeln hervorgerufen werden (Moll et al., 2002b). Als Vergleichsbedingungen dienten zum einen Szenen neutralen Inhalts, zum anderen Szenen, welche unangenehme Emotionen hervorrufen, aber ohne moralischen Bezug sind. Der Versuch unterschied sich somit von dem obigen in der Verwendung visueller Szenen an Stelle der dargebotenen Sätze sowie in der rein passiven Betrachtung an Stelle des aktiven Urteils mit geforderter Entscheidung und Reaktion des Probanden.

Beim Vergleich der moralischen mit der neutralen Bedingung stellte sich ein Netzwerk dar mit Aktivierungen im Präfrontal- und Temporallappen, in den Amygdalae, im Mittelhirn, in temporo-occipitalen Regionen und im Präcuneus (vgl. Abb. 6).



Abbildung 6: fMRT-Signal beim Vergleich der moralischen mit der neutralen Bedingung (Moll et al., 02b). Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach gelb zunehmend).

Es folgte ein Vergleich der moralischen Szenen gegenüber den unangenehmen Szenen ohne moralischen Bezug, um so für den Anteil der unangenehmen Emotionen in der moralischen Bedingung zu kontrollieren. Dabei zeigten sich der mediale orbitofrontale Gyrus, der mediale präfrontale Kortex, der Sulcus temporalis superior und der posteriore Gyrus temporalis medialis aktiv. Gegenüber dem Vergleich der moralischen mit der neutralen Bedingung zeigten sich also keine Aktivierungen im Frontalpol und Temporalpol, in den Amygdalae, im Präcuneus und im Gyrus fusiformis mehr (vgl. Abb. 7).



Abbildung 7: fMRT-Signal beim Vergleich der moralischen mit der nicht-moralischen, aber unangenehmen Bedingung (Moll et al., 02b). Die Signifikanz des BOLD-Signalunterschieds zwischen den Bedingungen ist farblich dargestellt (von rot nach gelb zunehmend).

1.2 Zusammenfassung bisheriger Studienergebnisse und Entwicklung der Fragestellung

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zeigen Hirnregionen, die beim moralischen Urteilen konsistent aktiviert werden, jedoch finden sich auch inkonsistente Ergebnisse. Der mediale Präfrontalkortex und der posteriore Sulcus temporalis superior wurden konsistent in bisherigen Studien gefunden. Dabei wurden unterschiedliche Stimuli verwendet: Greene et al. untersuchten die Entscheidung über komplexe moralische Dilemmata mit unterschiedlich emotionalem Inhalt („persönliche“ und „unpersönliche“) (Greene et al. 01), und Moll et al. ließ die Probanden emotional gefärbte Sätze (auditiv oder visuell dargeboten) beurteilen (Moll et al., 2001; Moll et al., 2002a). In einer weiteren Studie von Moll et al. mussten die Probanden Bilder betrachten, in denen moralische Regelbrüche gezeigt wurden (Moll et al., 2002b). In Zusammenschau der bisherigen Arbeiten blieb unklar, welche dieser Aktivierungen den emotionalen Inhalt, die Präsentation von Gewalt oder die reine Verarbeitung eines Dilemmas repräsentieren, im Gegensatz zur eigentlichen moralischen Entscheidung selbst. So wurde zwar in den Studien von Moll et al. versucht, für den Faktor „Emotion“ zu kontrollieren, und auch der Vergleich von sowohl „moralisch persönlichen“ als auch „moralisch unpersönlichen“ Dilemmata gegenüber den „nicht-moralischen“ Dilemmata stellt einen Ansatz zur Trennung der Faktoren „Moral“ und „Emotion“ dar. Die Kontrolle für die Emotionalität, wie sie in vorhergehenden Studien versucht wurde, führte jedoch nicht zu einem konsistenten Ausschluss spezifischer Regionen. Es fehlte bisher ein Versuchsdesign, welches einfache (nicht-dilemmatische) Entscheidungen fordert und von Anfang an versucht, körperliche Gewalt und somit die emotionale Reaktion auf die präsentierten Reize möglichst gering zu halten. Eine völlige Auftrennung der Faktoren „Moralisches Urteilen“ und „Emotion“ scheint, wie bereits erwähnt, kaum möglich oder sinnvoll, da Emotionen zum moralischen Urteil untrennbar dazugehören scheinen (Haidt, 2001). Auch die spezifische Darstellung des Effekts der Darbietung körperlicher Gewalt, wie in den Dilemmata-Experimenten von Greene et al. ansatzweise dargestellt, bedurfte einer Untersuchung durch einen Versuch, dessen Szenarien dem nicht-dilemmatischen Charakter des alltäglichen moralischen Urteilens eher entsprachen.

Nach der Übersicht über die Ergebnisse bisheriger bildgebender Studien zur Neurokognition der Moral stellten sich also insbesondere folgende Fragen:

- Welche Areale des Gehirns zeigen eine erhöhte neuronale Aktivität während einfacher, nicht dilemmatischer moralischer Urteilsprozesse in einem Versuchsdesign, welches auf die Darbietung von Gewalt verzichtet?

Dieser Frage widmete sich das erste Experiment der vorliegenden Arbeit.

- Welche Areale des Gehirns zeigen während des moralischen und semantischen Urteilens eine erhöhte oder verminderte neuronale Aktivität in der Verarbeitung von Szenarien mit der Darbietung von Gewalt gegenüber solchen ohne Darbietung von Gewalt?

Dieser Frage folgte das zweite Experiment der vorliegenden Arbeit. Zudem sollte erneut das moralische mit dem semantischen Urteil verglichen werden, allerdings nicht unter dem Verzicht auf direkte körperliche Gewalt. Stattdessen sollte die Einführung eines zwei-faktoriellen Designs mit den Faktoren „Moralisches Urteilen / Semantisches Urteilen“ und „Gewaltpräsentation / keine Gewaltpräsentation“ für den Einfluss der körperlichen Gewalt und der hierdurch ausgelösten Emotionen kontrollieren.

1.2.1 Erstes Experiment – Herleitung und Formulierung der Hypothese

Im ersten Experiment ging es darum, zu untersuchen, in welchen Gehirnregionen sich die Aktivität während des einfachen (nicht-dilemmatischen) moralischen Urteilens von der Aktivität während des semantischen Urteilens unterscheidet. Hierzu wurde ein Blockdesign (siehe hierzu Kap. 2.1.3) gewählt. Um den Effekt stark emotionaler Reize zu vermeiden, enthielten die präsentierten Szenarien niemals eine direkte Körperverletzung.

In vorangegangenen Studien zum moralischen Urteil zeigten sich relativ konsistent Aktivierungen im Bereich des Sulcus temporalis superior und des medialen präfrontalen Kortex. Der Versuch, den Einfluss der Emotionalität zu kontrollieren, führte in vorhergehenden Studien nicht zu einem konsistenten Ausschluss von Aktivierungen bestimmter Regionen. Der Vergleich der „persönlichen“ gegenüber den „unpersönlichen“ Dilemmata zeigte u.a. eine Aktivierung im posterioren Gyrus cinguli (Greene et al. 01), eine Region, die auch mit der Verarbeitung bedrohlicher Stimuli in Zusammenhang gebracht wurden ist (Maddock und Buonocore, 1997).

Auch in Studien zur „Theory-of-mind“ (die Vorstellung des mentalen Zustands anderer Personen) zeigten sich Aktivierungen im Bereich des Sulcus temporalis superior und des medialen präfrontalen Kortex (Castelli et al., 2000; Gallagher und Frith, 2003; Goel et al., 1995). Da das „Hineinversetzen“ in andere Personen zur Abschätzung der Folgen einer Handlung auf diese Personen wichtig ist, sollte die moralische Beurteilung einer Handlung eine „Theory-of-mind“ voraussetzen. Daher sind beim moralischen Urteil zumindest teilweise die gleichen Aktivierungen zu erwarten wie bei Theory-of-mind-Aufgaben.

Im ersten Experiment waren aufgrund vorangegangener Studien über Moral, soziale Kognition und Emotion, Aktivierungen im Bereich des Sulcus temporalis superior und des medialen präfrontalen Kortex, insbesondere seines ventromedialen Anteils, während des moralischen Urteilens zu erwarten. Aufgrund des Verzichtes auf die Darbietung direkter körperlicher Gewalt in den Stimuli war eine Aktivierung im posterioren Gyrus cinguli nicht zu erwarten.

1.2.2 Zweites Experiment – Herleitung und Formulierung der Hypothese

Das zweite Experiment diente zum einen der Untersuchung des Einflusses von direkter körperlicher Gewalt, zum anderen einer Reproduktion der Ergebnisse mittels eines anderen Versuchsdesigns (ereigniskorreliertes Zwei-Faktorielles-Design statt Blockdesign – siehe hierzu Kap. 2.1.3). Einerseits sollte ein Vergleich der Verarbeitung der Szenarien, welche Gewalt enthielten, mit der Verarbeitung der Szenarien, welche keine Gewalt enthielten, erfolgen, um den Faktor „Gewalt“ darzustellen. Andererseits wurde das moralische Urteilen mit dem semantischen Urteilen verglichen.

Die Vielfalt der Ergebnisse der Studien über Emotionen (Phan et al., 2002) gibt wenig Anhalt für verlässliche Vorhersagen bezüglich des Einflusses der Emotionalität auf das moralische Urteilen. Die Mehrzahl der Studien betonen jedoch die Rolle der Amygdalae (Hamann und Mao, 2002; Isenberg et al., 1999; Strange et al., 2000; Tabert et al., 2001; Zald, 2003), und des posterioren Gyrus cinguli (Maddock und Buonocore, 1997) in der Emotionsverarbeitung, insbesondere von bedrohlichen Stimuli. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass vorausgegangene Studien trotz Gewalt enthaltender Stimuli nur teilweise in diesen Regionen Aktivierungen fanden, was einerseits einigen Studien zur Emotionsverarbeitung zu widersprechen scheint, und andererseits auf die Variabilität in den Studienergebnissen zur Neuroanatomie emotionaler Verarbeitungen hindeutet.

Bezüglich der Verhaltensdaten waren aufgrund von Untersuchungen über die Verarbeitung von bedrohlichen Stimuli (Dijksterhuis und Aarts, 2003; Ohman et al., 2001) schnellere Antwortzeiten als Effekt der Gewaltpräsentation zu erwarten.

Beim Vergleich der Gewaltszenarien waren durch die Gewaltpräsentation Aktivierungen im posterioren Gyrus cinguli und in den Amygdalae zu vermuten.

Beim Vergleich des moralischen mit dem semantischen Urteilen war wie im ersten Experiment eine Aktivierung des Sulcus temporalis superior und des medialen präfrontalen Kortex zu erwarten.

Zur Prüfung dieser Hypothesen wurde die funktionelle Magnetresonanztomographie benutzt, während die Probanden einfache moralische Entscheidungen über Handlungen zu treffen hatten, die leicht als gut oder schlecht einzuschätzen waren, das heißt keine Dilemmata darstellten. Als Kontrollbedingung diente das semantische Urteilen.

2. Material und Methoden

Es sollen zunächst grundsätzliche Aspekte der Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie erläutert werden. Im Anschluss beschreibe ich die für die vorliegende Arbeit angewandte spezielle Methodik.

2.1 Methodik: Allgemeiner Teil

2.1.1 Funktionelle Bildgebung und Datenanalyse

Der Begriff „Funktionelle Bildgebung“ steht für Techniken, die es erlauben, Korrelate neuronaler Aktivität im menschlichen Gehirn während definierter Ereignisse aufzuzeichnen. Schon vor der Entwicklung der fMRT wurden die Positronen-Emissionstomographie (PET) und die Single-Photonen-Emissionscomputertomographie (SPECT) entwickelt. Ein Nachteil dieser Verfahren besteht darin, dass den Probanden radioaktive Tracer-Substanzen verabreicht werden müssen, um Durchblutung oder Stoffwechsel darstellen zu können. Weitere Nachteile dieser Verfahren sind eine lange Untersuchungsdauer und eine schlechte zeitliche Auflösung. Die fMRT zeichnet sich gegenüber diesen Verfahren durch eine bessere räumliche (Millimeterbereich) und zeitliche Auflösung (Sekundenbereich) aus (Menon und Kim, 1999). Es wird zwar nicht die zeitliche Auflösung der Elektroenzephalographie (EEG) oder der Magnetenzephalographie (MEG) erreicht, die bei diesen Verfahren im Millisekundenbereich liegt, jedoch ist deren räumliche Auflösung der fMRT unterlegen. Viel versprechende Forschungsansätze beschäftigen sich derzeit mit der Kombination der fMRT mit der Elektroenzephalographie (Ritter und Villringer, 2006).

2.1.2 Physiologische Grundlagen der fMRT

Die fMRT nutzt aus, dass es während neuronaler Aktivität zu Veränderungen der zerebralen Hämodynamik kommt (Heeger und Ress, 2002; Logothetis, 2003; Villringer und Dirnagl, 1995). Dabei wird nicht direkt der Blutfluss gemessen, sondern die Änderung im sogenannten T2*-Signal. Dieses ändert sich durch den mit einer vermehrten Durchblutung einhergehenden Abfall der Konzentration von Deoxyhämoglobin, daher nennt man es auch das BOLD-Signal (Blood-Oxygen-Level-Dependent). Es wird durch die vermehrte Durchblutung des Gewebes mehr oxygeniertes Hämoglobin angeliefert als verbraucht. Daher kommt es insgesamt zu einem Konzentrationsanstieg des Oxyhämoglobins und einem Abfall der Deoxyhämoglobin-Konzentration. Oxygeniertes und deoxygeniertes Hämoglobin besitzen verschiedene

magnetische Eigenschaften. Die Eisenionen des Deoxyhämoglobins verhalten sich paramagnetisch, während die im Oxyhämoglobin sich diamagnetisch verhalten. Bei einem Abfall der lokalen Deoxyhämoglobinkonzentration nimmt die paramagnetische Wirkung ab, und es kommt zu einer Zunahme des MR-Signals (vgl. Abb. 8).

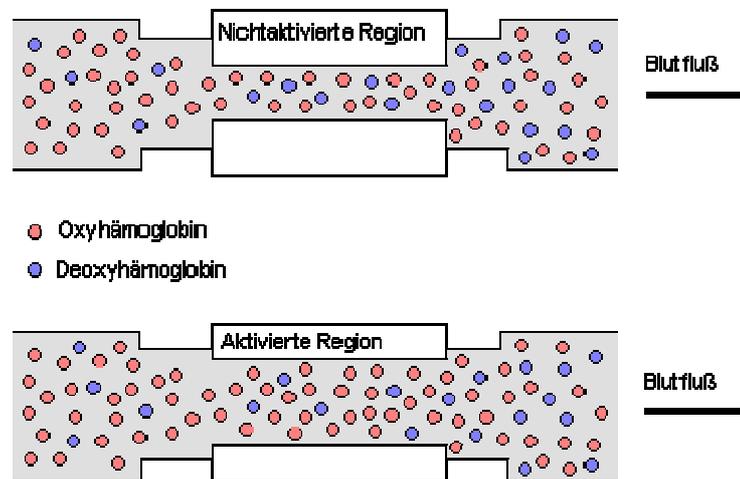


Abbildung 8: Entstehung des BOLD-Signals: In der aktivierten Region steigt der Blutfluß – und damit das Verhältnis von oxygenierten zu deoxygenierten Hämoglobin. Dies bewirkt eine Zunahme des MR-Signals.

Das durch einen Stimulus ausgelöste BOLD-Signal weist einen charakteristischen Zeitverlauf auf: Etwa zwei bis drei Sekunden nach Stimulusbeginn beginnt das Signal anzusteigen, um nach sechs bis acht Sekunden sein Maximum zu erreichen, je nach Länge des Stimulus in etwa auf diesem Niveau zu bleiben und daraufhin wieder abzufallen (Boynton et al., 1996) (vgl. Abb. 9). Durch das BOLD-Signal wird somit eine indirekte Aufzeichnung der kortikalen Aktivität beim Menschen ohne den Einsatz von exogenem Kontrastmittel ermöglicht (Bandettini et al., 1992; Frahm et al., 1992; Kwong et al., 1992; Ogawa et al., 1992).

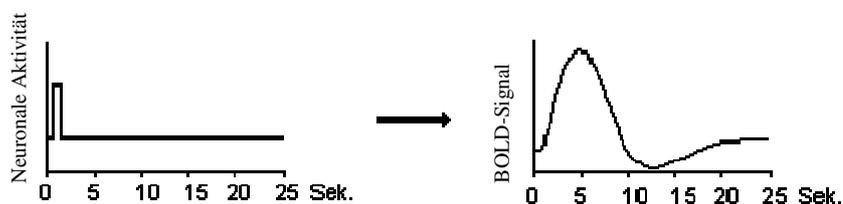


Abbildung 9: Verlauf des BOLD-Signals nach neuronaler Aktivität

Während das ereigniskorrelierte Design den Vorteil hat, dass der Verlauf des BOLD-Signals auf einzelne Ereignisse besser zu beurteilen ist, um so beispielsweise wirkliche Aktivierungen von Artefakten unterscheiden zu können, ist das Block-Design besonders sensitiv für die Ermittlung von Karten neuronaler Aktivität (Liu et al., 2001). Da es zunächst um das Aufdecken der neuronalen Netze, welche am einfachen moralischen Urteil beteiligt sind, ging, kam im ersten Experiment das Block-Design zum Einsatz.

Einige methodische Probleme können beim Blockdesign auftreten, beispielsweise die Gewöhnung während des Blocks an den Stimulus („Habituation“). Dies gilt nicht nur für Wahrnehmungsfunktionen, sondern betrifft auch die emotionale Verarbeitung (Breiter et al., 1996; Feinstein et al., 2002; Phan et al., 2002). Außerdem könnten die Probanden leichter Lösungsstrategien entwickeln, die normalerweise, bei einzelnen Aufgaben, nicht angewandt werden und daher nicht der zu untersuchenden Funktion entsprechen. Ein weiterer Punkt ist das Wissen um die Art der folgenden Aufgabe und die Erwartung des Probanden („Cognitive Set“). Die Erwartung zweier verschiedener Aufgaben kann mit verschiedenen neuronalen Aktivitäten einhergehen, deren Unterschied nicht dem zu untersuchenden Unterschied der Bedingungen entspricht.

Im zweiten Experiment kam das ereigniskorrelierte Design zum Einsatz. Dieses erleichterte die Einführung des zusätzlichen Faktors „direkte Körperverletzung“, da dieser nicht als vom Probanden deutlich wahrnehmbare Kategorie auftreten musste, wie es beim Blockdesign der Fall gewesen wäre, sondern in randomisierter Form in den Sätzen auftauchte, ohne dass der Proband wusste, dass es sich hierbei um ein zu untersuchendes Merkmal handelte. Hierdurch wird das Risiko umgangen, dass der Proband durch das Wissen um diese Kategorie andere Aufmerksamkeits- oder Verarbeitungsprozesse anwendet, als dies in der natürlichen, alltäglichen Situation der Fall ist. Auch die Gewöhnung der emotionalen Reaktion an den Stimulus „Gewalt“ sollte im ereigniskorrelierten Design eine geringere Rolle spielen als im Blockdesign.

2.1.4 Grundlagen der fMRT-Datenanalyse

Die Auswertung der fMRT-Daten nach deren Aquisition im Scanner erfolgt in einigen Schritten, die hier in Kürze erklärt werden sollen, bevor im speziellen Teil der Methodik beschrieben wird, welche dieser Schritte in den Experimenten angewandt wurden.

Die Vorverarbeitung der Daten umfasst: Aquisitionszeitkorrektur, Bewegungskorrektur, Koregistrierung, Normalisierung (Transformation in den Talairachraum), Glättung und Kortex-Rekonstruktion.

Aquisitionszeitkorrektur (Erhebungszeitkorrektur)

Die Aquisitionszeitkorrektur dient der Berücksichtigung der Tatsache, dass nicht alle Schichten gleichzeitig aufgenommen werden können, und daher zeitliche Verschiebungen zwischen verschiedenen Schichten auftreten. Diese werden herausgerechnet, um die später durchzuführende Regressionsanalyse der Zeitverläufe zu ermöglichen.

Bewegungskorrektur

Bewegungskorrektur: Das Ziel der Bewegungskorrektur liegt darin, Bewegungsartefakte zu korrigieren. Minimale Bewegungen des Kopfes sind nicht zu vermeiden. Da aber auch schon geringste Kopfbewegungen zu Signaländerungen führen können, welche Aktivierungen vortäuschen können oder die gesuchten, durch die Aktivierung hervorgerufenen Signaländerungen überdecken können, wird mit einer Bewegungskorrektur versucht, Signaländerungen, denen eine Bewegung zugrunde liegt, herauszufiltern. Dabei werden die Datensätze mit der ersten funktionellen Aufnahme der Messreihe verglichen und Bewegungen in Form einer Translation und/oder Rotation festgestellt. Die sechs Bewegungsparameter, die berechnet werden, beschreiben eine Translation in Richtung der x-, y-, oder z-Achse oder eine Rotation um diese Achsen. Anhand dieser Parameter kann jede Bewegung des Kopfes erfasst und dementsprechend korrigiert werden.

Beseitigung eines linearen Drifts

In den Zeitverläufen der Signalintensität lässt sich meist ein linearer Drift nachweisen.

Dieser entspricht nicht einem physiologischen Mechanismus, sondern er ist durch Magnetfeldinstabilitäten des Scanners verursacht. Er kann vom Auswertungsprogramm erkannt und ausgeglichen werden.

Koregistrierung

Die funktionellen Bilder werden den anatomischen angepasst. Dies ermöglicht die Darstellung funktioneller Daten, d.h. der mittels der EPI-Sequenz während der Aufgabenbearbeitung des Probanden gewonnenen Daten, auf anatomischen Aufnahmen. „EPI“ steht für „Echo planar imaging“: es handelt sich um ein MRT-Aufnahmeverfahren, das aufgrund seiner Empfindlichkeit für geringe Suszeptibilitätsunterschiede und seiner hohen Aufnahmegeschwindigkeit zur Untersuchung des BOLD-Signals gut geeignet ist.

Die Koregistrierung vereinfacht zudem eine Normalisierung der funktionellen Daten.

Normalisierung

Die Vergleichbarkeit statistischer Karten individueller Gehirne wird durch die individuellen anatomischen Unterschiede eingeschränkt. Zum Vergleich verschiedener Versuchspersonen innerhalb einer Studie als Gruppenanalyse, wie auch zum Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien ist eine Anpassung der individuellen Daten in einen standardisierten Raum sinnvoll. Zur Überführung der Daten in einen standardisierten anatomischen Raum wird eine Normalisierung vorgenommen. Die dafür notwendige Transformationsmatrix wird dabei aus der Lage definierter Punkte der Anatomie des Probandengehirns (vordere und hintere Kommissur, höchster und tiefster, vorderster und hinterster sowie der am weitesten außen gelegene Punkt beider Hemisphären des Gehirns) in Relation zu den entsprechenden Punkten eines Referenzgehirns ermittelt. Hierfür wird zumeist das Referenzgehirn nach Talairach und Tournoux (Talairach und Tournoux, 1988) verwendet oder das Referenzgehirn des Montreal Neurological Institute (MNI) (Evans und Collins, 1993). Daten anatomisch unterschiedlicher Gehirne werden somit direkt vergleichbar gemacht.

Glättung

Die zeitliche Glättung dient der Herausfilterung von Schwankungen im zeitlichen Signalverlauf, die nicht von den Versuchsbedingungen abhängen. Der Hochpassfilter eliminiert hierbei Schwankungen, die langsamer als die vierfache mittlere Epochenlänge sind. Dieses können sowohl physiologische, als auch vom MRT-Scanner abhängige Schwankungen sein. Der Tiefpassfilter glättet die Zeitreihe mittels eines Gauss-gewichteten Moving Average-Filters mit einem üblichen FWHM (= Full Width at Half Maximum) von vier Sekunden. Hierbei werden vor allem Rauschsignale eliminiert, welche vom MRT-Scanner ausgehen.

Ziel der räumlichen Glättung ist es, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Es wird dabei die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vereinzelter signifikanter Voxel verringert, während Veränderungen der BOLD-Antwort in zusammenhängenden Voxeln (=Clustern) dargestellt werden. Es werden räumliche Signalsprünge geglättet, d.h. große Differenzen im Signal zweier benachbarter Voxel werden verringert. Angewandt wird hierfür meist ein Gauss'scher Kernel, dessen Spannweite (FWHM) je nach Größe der erwarteten Aktivierungen variiert werden kann. Theoretischer Hintergrund hierfür ist das „matched filter theorem“, welches besagt, dass der Filter, der am ehesten an das Signal angepasst ist, das beste Signal-Rausch-Verhältnis gewährleistet. Hierdurch kommen funktionell wichtige anatomische Strukturen zur Darstellung. Zufällige Signalerhöhungen in einzelnen Voxeln werden dagegen eliminiert. Der Vorteil der räumlichen Glättung für Gruppenanalysen besteht darin, dass sich die Aktivierungen stärker überlappen. Für Gruppenanalysen wird aufgrund der anatomischen Variabilität ein relativ breiter Kernel (z.B. 12 mm) verwendet. Der Nachteil der räumlichen Glättung besteht in einem Verlust in der räumlichen Auflösung.

Kortex-Rekonstruktion: Segmentierung und Entfaltung

Durch die Segmentierung können zum Schädel gehörende Voxel von zum Gehirn gehörenden Voxeln und die graue von der weißen Substanz getrennt werden. Dies ist durch die unterschiedlichen Signalintensitäten verschiedener Gewebe im T1-gewichteten Bild möglich. Anhand eines Schwellenwerts werden Voxel höherer Intensität als weiße Substanz, und alle Voxel niedrigerer Intensität als graue Substanz definiert. Anschließend kann die graue Substanz entfaltet werden, was die Darstellung der in den Sulci liegenden Areale verbessert (vgl. Abb. 12).

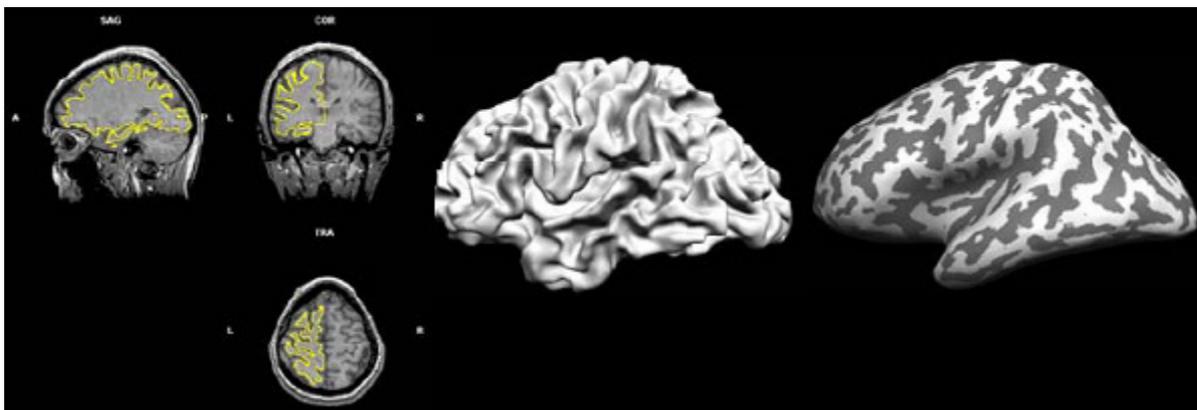


Abbildung 12: Segmentierung des Gehirns und Entfaltung des Kortex. Auf dem entfalteten Kortex sind die Gyri hellgrau, die Sulci dunkelgrau dargestellt.

Auf die Vorverarbeitung der Daten folgt die Modellierung.

Modellierung

Das Prinzip der Korrelation des Verlaufs der Signaländerung in jedem einzelnen Voxel mit einer Referenzfunktion, die den Zeitverlauf der verwendeten Stimuli repräsentiert, ist die Grundlage der Erstellung funktioneller Karten des Gehirns. Eine effektive multiple Regressionsanalyse bietet das Allgemeine Lineare Modell (ALM), welche sich seit der Einführung in die fMRT-Datenanalyse durch Friston und Mitarbeiter etabliert hat (Friston et al., 1995). Dieses versucht, durch eine Linearkombination verschiedener Effekte und einem restlichen Rauschen den Signalverlauf der Voxel zu modellieren.

Es kann durch die Gleichung $Y(t) = G_1(t)\beta_1 + G_2(t)\beta_2 + e(t)$ dargestellt werden, wobei $Y(t)$ die beobachtete Variable (den Signalzeitverlauf im Voxel) darstellt.

$G_1(t)$ = Designmatrix (der ersten unabhängigen Variable)

$G_2(t)$ = Designmatrix (der zweiten unabhängigen Variable)

β_1 = Parametermatrix (der ersten unabhängigen Variable)

β_2 = Parametermatrix (der zweiten unabhängigen Variable)

$e(t)$ = Fehlermatrix

Es handelt sich bei der üblicherweise durchgeführten Analyse um eine univariate Varianzanalyse, d.h. die Signalzeitverläufe in den einzelnen Voxeln werden als voneinander unabhängig betrachtet.

Die Versuchsbedingungen werden mit einer an die Blutflussantwortfunktion angepassten sogenannten „Box-car-Funktion“ dargestellt. Mit solchen Referenzfunktionen werden die Zeitverläufe des BOLD-Signals jedes einzelnen Voxels in einer Regressionsanalyse verglichen. Jedem Voxel wird hierbei ein Korrelationskoeffizient r zugeordnet, dessen Höhe der Ähnlichkeit von Signalverlauf und Referenzfunktion entspricht. Überschreitet die Höhe des Koeffizienten einen definierten Schwellenwert, wird der Voxel farblich kodiert dargestellt. Es können auch Vergleiche zwischen den so entstandenen Werten verschiedener Bedingungen ermittelt werden, was man auch als „Kontraste“ bezeichnet, welche wiederum farblich kodiert als funktionelle Karte des Kortex dargestellt werden können. Die Festlegung eines Schwellenwertes, ab wann eine Korrelation als signifikant zu gelten hat, trifft auf folgende Schwierigkeit: Ist der Wert zu hoch angelegt, könnten kleinere, aber wichtige Aktivierungen verloren gehen, ist er zu niedrig gewählt, könnten die Aktivierungskarten zu viele Pixel anzeigen, die nichts mit der neuronalen

Aktivität zu tun hatten. Klare Kriterien zur Festlegung eines bestimmten Schwellenwertes sind schwer zu definieren. Wenn der p-Wert bei 0,05 liegt, wären somit bei einer Matrix von 64 x 64 Voxeln, wie sie im vorliegenden Experiment gewählt wurde, 204 Voxel von 4096 Voxeln zufällig signifikant. Ein Versuch, diese falsch positiven Aktivierungen (Fehler vom Typ I), zu minimieren, ist die Definition einer minimalen Clustergröße (Forman et al., 1995). Kleinere Aktivierungen werden so beim Erstellen der statistischen Karte vernachlässigt. Eine weitere Methode ist die Anwendung einer Bonferroni-Korrektur. Hierbei wird der p-Wert durch die Zahl der Gehirnvoxel N dividiert ($p' = p / N$). Durch diese Korrektur gehen jedoch auch viele wirkliche Aktivierungen verloren. Die Festlegung eines p-Wertes als Signifikanzschwelle bleibt somit recht willkürlich. Ein in bildgebenden fMRT-Studien üblicher unkorrigierter p-Wert liegt bei einem $p < 0,001$.

In Gruppenstudien kommt die sogenannte Analyse mit gemischten Effekten („mixed effects“) zum Einsatz. Hierbei werden die ermittelten Kontraste der Einzelprobanden („fixed effects“) auf einer zweiten Ebene analysiert (Frackowiak et al., 2003). Die Analyse mit gemischten Effekten erlaubt es, die Ergebnisse auf die Population, aus der die Stichproben gezogen wurden, zu generalisieren.

Autokorrelationskorrektur

Das BOLD-Signal innerhalb eines Voxels an einem bestimmten Zeitpunkt ist nicht unabhängig von vorausgegangen Zeitpunkten, was durch eine falsche Einschätzung der Parametermatrix und der Freiheitsgrade zu einer Häufung falsch positiver Ergebnisse führt. Die Autokorrelationskorrektur bietet eine Korrektur dieser falsch positiven Ergebnisse bei der ALM-Berechnung.

Signalzeitverlaufs- und Signalveränderungsdiagramme

Die Zeitverläufe in den Voxeln, die statistisch signifikante Signalanstiege zeigen, können über die Probanden gemittelt dargestellt werden. Dabei werden alle zum Cluster gehörenden Voxel mit einbezogen. Die Zeitverläufe sind dabei zeitlich an den Anfang der Stimuluspräsentation gebunden. Hierdurch ist es möglich, Aktivierungen von Artefakten zu unterscheiden, wenn deren Signalanstieg schon vor Stimulusbeginn einsetzt. Außerdem können in den Kontrastkarten die Aktivierungen, die durch einen starken BOLD-Signalanstieg der einen Bedingung hervorgerufen werden, unterschieden werden von solchen, die durch eine Deaktivierung der zweiten Bedingung entstanden sind. Eine andere Form der Darstellung ist die durchschnittliche BOLD-Signaländerung in den Voxeln, die statistisch signifikante Signalanstiege zeigen. Hierbei wird

die prozentuale Signaländerung über die Zeit während der jeweiligen Versuchsbedingung gemittelt.

Problematik der Artefakte in der fMRT

Das Ziel der fMRT besteht darin, solche MR-Signale abzubilden, welche durch neuronale Aktivität hervorgerufen werden. Signaländerungen entstehen jedoch auch durch Faktoren, die unabhängig von der neuronalen Aktivität auftreten. Diese können dann eine Aktivierung vortäuschen, wo keine stattgefunden hat, oder sie können tatsächliche Aktivierungen überlagern und diese nicht zur Darstellung kommen lassen.

Bewegungsartefakte

Stimuluskorrelierte Kopfbewegungen des Probanden führen, besonders an solchen Stellen wo zwei Bereiche mit starken MR-Signalunterschieden nebeneinander liegen, wie zum Beispiel dem Rand des Gehirns, zu sogenannten Bewegungsartefakten.

Zur Minimierung dieser unwillkürlichen Kopfbewegungen lässt sich der Kopf mit Hilfe eines Vakuumkissens und Stabilisatoren an der Kopfspule stabilisieren. Dieses Verfahren ist bequem für den Probanden und führt zu einer deutlichen Reduktion der Kopfbewegungen. Es kam auch in den vorliegenden Experimenten zum Einsatz. Trotzdem sind minimale Bewegungen nicht zu vermeiden. Diese müssen im Nachhinein mittels eines Bewegungskorrekturalgorithmus aus dem Datensatz herausgerechnet werden.

Neben solchen stimuluskorrelierten Kopfbewegungen sind auch physiologische Bewegungen durch Herzschlag und Atmung als Quelle von Artefakten bekannt.

Suszeptibilitätsartefakte

EPI-Sequenzen sind für Suszeptibilitätsunterschiede sehr sensibel. Das macht sie zum einen für die geringen magnetischen Veränderungen während der Blutflussantwort auf eine neuronale Aktivierung brauchbar, zum anderen macht es sie aber auch für die sogenannten Suszeptibilitätsartefakte empfänglich. Diese entstehen in Regionen, wo hohe Suszeptibilitätsunterschiede bestehen, wie zum Beispiel in der Nachbarschaft der luftgefüllten Sinus. Im orbitofrontalen Kortex bewirkt die Nachbarschaft des luftgefüllten Sinus sphenoidalis einen solchen Dichteunterschied. Die Darstellung des anterioren Temporallappens wird ebenfalls oft durch die Nachbarschaft der Mastoidzellen gestört. Da diesen beiden Regionen wichtige Rollen im Sozialverhalten zugeschrieben werden, war das Vorhandensein von Suszeptibilitätsartefakten auch in der vorliegenden Arbeit zu bedenken. Der bewirkte

Signalverlust kann neuronale Aktivierungen überdecken und somit deren Darstellung verhindern. Es kann versucht werden, eine Verringerung der Artefakte durch eine Homogenisierung des Magnetfeldes („shimming“), durch eine Verringerung der Schichtdicke und der Echozeit (TE) zu bewirken (Di Salle et al., 1999).

Die funktionellen Datensätze der vorliegenden Arbeit wurden vor der Einbeziehung in die Gruppenanalyse auf das Vorliegen solcher Artefakte überprüft. Da sich keine größeren Artefakte bei den Probanden fanden, musste kein Proband aufgrund von Artefakten aus der Studie ausgeschlossen werden.

2.2 Methodik: Spezieller Teil

2.2.1 Probanden

Erstes Experiment:

Acht Probanden im Alter von $27,8 \pm 4,5$ Jahren (Mittelwert \pm Standardabweichung) beteiligten sich an der Studie, sieben Probanden waren männlich.

Zweites Experiment:

Zwölf Probanden im Alter von $25,7 \pm 1,55$ Jahren (Mittelwert \pm Standardabweichung) beteiligten sich an der Studie, zehn Probanden waren männlich.

Keiner der Probanden litt an neurologischen, psychiatrischen oder internistischen Erkrankungen. Wegen der möglichen Unterschiede bezüglich der Lokalisation der an der Sprachverarbeitung beteiligten Areale, wurden ausschließlich Rechtshänder in die Studie miteinbezogen. Alle Probanden waren Studenten oder Ärzte. Die möglichen Kontraindikationen für die MRT-Untersuchung wurden ausgeschlossen (Metallteile im Körper, Herzschrittmacher, Klaustrophobie), und das schriftliche Einverständnis der Probanden wurde vor der Untersuchung eingeholt. Die Studien wurden von der Ethikkommission der Charite genehmigt.

Keiner der Probanden hat an beiden Experimenten teilgenommen, um konfundierende Effekte durch die Wiedererkennung einzelner Sätze oder andere Lerneffekte, zu vermeiden.

2.2.2 Satzmaterial

2.2.2.1 Satzmaterial des ersten Experiments

Das Satzmaterial des ersten Experiments wurde in Form eines Blockdesigns präsentiert. Es bestand aus insgesamt 120 Sätzen, worin 60 zu beurteilende Szenarien beschrieben waren. 30 Szenarien sollten moralisch, die anderen 30 semantisch beurteilt werden (d.h. der Proband sollte entscheiden: „Ist die im Satz beschriebene Handlung moralisch korrekt oder verwerflich?“, bzw. „Ist die Bedeutung des Satzes sinnvoll oder nicht?“). Jedes Szenario bestand aus einem Doppelsatz, d.h. aus zwei nacheinander dargebotenen Sätzen: einem Einführungssatz, in dem die Situation geschildert wird, in welcher sich die zu beurteilende Handlung abspielt und einem Entscheidungssatz, welcher die Handlung selbst beschreibt. Die Sätze wurden pseudorandomisiert und in jeder Bedingung in fünf Blöcke zu jeweils 6 Doppelsätzen unterteilt, deren Abfolge ebenfalls pseudorandomisiert wurde. Alle Sätze waren grammatikalisch und orthographisch korrekt. Um eine Induktion stärkerer Emotionen zu vermeiden, wurde inhaltlich

darauf geachtet, dass sich keine direkte Körperverletzung finden ließ. Die beschriebene Situation sollte kein Dilemma darstellen, sondern eindeutig als moralisch oder semantisch korrekt bzw. inkorrekt zu beurteilen sein, was vor dem Experiment durch fünf unabhängige Probanden, als auch nach dem Experiment von allen Probanden bestätigt wurde.

Innerhalb der jeweiligen Bedingung waren genauso viele korrekt wie inkorrekt zu beurteilende Sätze vorhanden, also 15 korrekte Doppelsätze und 15 inkorrekte Doppelsätze in jeder Bedingung, damit der Faktor „Korrektheit der Sätze“ als konfundierende Variable ausgeschlossen werden konnte. Ebenfalls, um keine Störvariablen einzuführen, wurden die Sätze in beiden Experimenten so erstellt, dass die gleichen Einführungssätze in beiden Bedingungen verwandt wurden und die Entscheidungssätze sich zwischen den zwei Bedingungen formal möglichst wenig unterschieden.

Zur Verdeutlichung sind im Folgenden einige Satzbeispiele gezeigt (siehe Tab. 1):

Einführungssatz	Entscheidungssatz	
	Moralisches Urteilen	Semantisches Urteilen
	Moralisch nicht verwerflich bzw. semantisch korrekt	
A hat sich ein neues Auto gekauft.	B bewundert das Auto.	A macht einen Spaziergang.
A hält eine öffentliche Rede.	Er ruft darin zum Beten auf.	A geht, nachdem er geruht hat.
A möchte ein Fahrrad haben.	A wendet sich an einen Händler.	A liest ein Buch statt des Briefes.
	Moralisch verwerflich bzw. semantisch inkorrekt	
Arzt A stellt bei Patientin C Syphilis fest.	Er informiert einen Journalisten.	A wartet einen Spaziergang.
A fährt mit öffentlichen Verkehrsmitteln.	Für die Fahrt bezahlt er nicht.	Er trinkt die Zeitung.
A hat sich Geld geliehen.	Er hat es nie zurückgegeben.	B schreibt einen Stift.

Tabelle 1: Satzbeispiele des ersten Experiments

2.2.2.2 Satzmaterial des zweiten Experiments

Das in Form eines ereigniskorrelierten Designs präsentierte Satzmaterial des zweiten Experiments bestand aus insgesamt 240 Sätzen, worin 120 Szenarien beschrieben sind, welche moralisch oder semantisch zu beurteilen waren. Auch hier bestand jedes Szenario aus zwei Sätzen: einem Einführungssatz und einem Entscheidungssatz. Der Unterschied zum ersten Experiment besteht darin, dass die Sätze sich durch Einführung des zusätzlichen Faktors „direkte Körperverletzung“ in vier Kategorien einteilen lassen. Dadurch lässt sich ein zwei-faktorielles Design erstellen, das heißt, die Auswirkungen der Sätze können entweder im Hinblick auf den Faktor „Moral“ miteinander verglichen werden, oder im Hinblick auf den Faktor „Gewalt“ (vergleiche Tab. 2).

	Mit direkter körperlicher Gewalt	Ohne direkte körperliche Gewalt
Moralisch zu beurteilende Sätze	Kategorie 1 = MUmK	Kategorie 2 = MUoK
Semantisch zu beurteilende Sätze	Kategorie 3 = SUmK	Kategorie 4 = SUoK

Tabelle 2: Einteilung der Satzkategorien - MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Jede Kategorie umfasste 30 Szenarien. Auch im zweiten Experiment waren innerhalb der jeweiligen Bedingung genauso viele korrekt wie inkorrekt zu beurteilende Sätze vorhanden, d.h. jeweils 15 korrekte Doppelsätze und 15 inkorrekte Doppelsätze pro Bedingung. Die beschriebenen Situationen (siehe Tabelle 3) stellten keine Dilemmata dar. Alle Sätze sollten eindeutig als korrekt oder inkorrekt zu beurteilen sein, was vor dem Experiment durch sechs Mitarbeiter und nach dem Experiment von allen Probanden in Form eines Fragebogens durch eine Einschätzung des Schwierigkeitsgrads der einzelnen Sätze bestätigt wurde (siehe hierzu Kap. 2.2.3.2 und 3.2.1.2: Fragebogen zum Grad der Schwierigkeit, Unmoral und Emotionalität). Alle Sätze waren grammatikalisch und gemäß deutscher Rechtschreibung korrekt.

Einleitungssätze	Entscheidungssätze
Kategorie 1 = MUmK (moralisches Urteilen, mit Körperverletzung)	moralisch verwerflich
A wartet auf seinen Konkurrenten.	Als dieser um die Ecke kommt, erschießt A ihn.
Der kranke Nachbar bittet A um Ruhe.	A schlägt ihm mit der Faust ins Gesicht.
M ist gestürzt und liegt verletzt am Boden.	A tritt ihm mit seinen Stiefeln in den Bauch.
	moralisch nicht verwerflich
K ist schon seit 30 Jahren Handwerker.	Bei der Arbeit sägt sich K den Finger ab.
A fährt Ski am liebsten in den Alpen.	A gerät in eine Lawine und erstickt.
B macht mit seiner Frau Urlaub auf Hawaii.	Beim Schwimmen wird B von einem Hai angegriffen.
Kategorie 2 = MUoK (moralisches Urteilen, ohne Körperverletzung)	moralisch verwerflich
A fährt abends mit dem Auto nach Hause.	Nachdem er eine Flasche Korn getrunken hat.
A fährt mit öffentlichen Verkehrsmitteln.	Für die Fahrt bezahlt er nicht.
A gefallen die Bilder in der Ausstellung nicht.	Er beschädigt sie daher mit einem Stift.
	moralisch nicht verwerflich
A trinkt in der Kneipe ein Bier.	Er geht, nachdem er das Bier bezahlt hat.
A verlässt nach dem Essen das Restaurant.	Er nimmt seinen grauen Mantel mit.
A versteckt jemanden in seiner Wohnung.	Weil eine Schlägerbande ihn sucht.
Kategorie 3 = SUMK (semantisches Urteilen, mit Körperverletzung)	semantisch inkorrekt
A arbeitet an der alten Werkbank.	Der eingequetschte Finger liest ein Buch.
A geht in den dunklen Keller hinunter.	Das abgehackte Bein schläft eine Zeitung.
Die Schiffsschraube treibt das Schiff voran.	Der gespaltene Oberkörper denkt allein.
	semantisch korrekt
A überquert die befahrene Strasse.	Er stolpert und fällt vor einen heranfahrenden Bus.
Der Fußweg ist spiegelglatt gefroren.	A rutscht aus und schlägt sich den Kopf auf.
Bauer A fährt im Herbst die Ernte ein.	Er fällt und stirbt in seinem Mährescher.
Kategorie 4 = SUoK (semantisches Urteilen, ohne Körperverletzung)	semantisch inkorrekt
A besucht eine Tanzveranstaltung.	Beim Zuschauen fordert einen Tanz zur Frau auf.
A hat morgen zweites Staatsexamen.	Er hört Tisch und schläft nicht für sich.
A hat überlegt ins Schwimmbad zu gehen.	Er lässt seinen ruhigen Gedanken trinken.
	semantisch korrekt
Es ist ein warmer Frühlingmorgen.	A trinkt ein Glas kühlen Himbeersaft.
A und B sitzen zusammen in seinem Garten.	A verrät B ein lange gehütetes Geheimnis.
B möchte einer Freundin etwas aufschreiben.	B kann seinen Stift nicht wieder finden.

Tabelle 3: Satzbeispiele des zweiten Experiments - MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUMK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

2.2.3 Verhaltensdaten: Erhebung und statistische Verarbeitung

2.2.3.1 Erhebung der Antwortzeiten

Die Aufgabe des moralischen und semantischen Urteilens erforderte von den Probanden eine Reaktion in Form eines Knopfdruckes. Dies diente zum einen dazu, sicher zu gehen, dass der Proband mitarbeitet, zum anderen konnten so Antwortzeiten des Probanden gemessen werden, um Unterschiede in der Aufgabenschwierigkeit aufzudecken, und die Ergebnisse in Hinblick hierauf interpretieren zu können. Als Antwortzeit galt die Zeit zwischen dem Beginn der Präsentation des zweiten Satzes, über welchen zu entscheiden war, und dem Knopfdruck des Probanden. Dieser wurde zuvor dazu aufgefordert, möglichst schnell und akkurat zu entscheiden und den jeweiligen Knopf zu drücken. Die Antwortzeiten wurden mit dem Präsentationsprogramm ERTS (Experimental Run Time System', Version 3.28, BeriSoft Cooperation, Frankfurt/M.) erfasst. Da bei einem Probanden ein Kabeldefekt vorlag, konnten für diesen Probanden keine Antwortzeiten erhoben werden. Anschließend wurden für jede Bedingung und jeden Probanden die Durchschnittswerte ermittelt und die Mittelwerte der Bedingungen mittels gepaarter T-Tests verglichen.

2.2.3.2 Erhebung der Einschätzung von Schwierigkeit, Emotionalität und Unmoral

Nach dem Versuch sollten die Probanden den Grad der Schwierigkeit der beiden Bedingungen einschätzen. Im ersten Experiment erfolgte dies durch eine Befragung, welche der beiden Bedingungen als schwieriger empfunden wurde. Im zweiten Experiment sollten die Probanden direkt im Anschluss an die MRT-Messung einen Fragebogen ausfüllen und jeden einzelnen Satz in Hinblick auf den Grad der Schwierigkeit, den Grad des Unmoralischen und den Grad der Emotionalität auf einer Skala von eins (sehr einfach / gar nicht unmoralisch / sehr schwach emotional) bis zehn (sehr schwierig / sehr unmoralisch / sehr emotional) einschätzen. Hier wurden für jede Bedingung und jeden Probanden die Mediane ermittelt und mittels des Wilcoxon-Tests verglichen, da es sich bei den Werten um ordinalskalierte, nicht normalverteilte Werte handelte.

2.2.4 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

2.2.4.1 Versuchsaufbau

Der apparative Aufbau des Versuchs unterschied sich bei beiden Experimenten nicht. Daher wird hier nicht zwischen Aufbau des ersten und des zweiten Experiments unterschieden:

Den Probanden wurden Ohrstöpsel gegeben, da der Lautstärkepegel im Scanner bis zu 120 dB erreichen kann. Der in einer Hochfrequenz-Spule liegende Kopf des auf dem Rücken liegenden Probanden wurde durch ein Vakuumkissen stabilisiert, um Bewegungsartefakte zu vermeiden. Auch wurde der Proband aufgefordert, während der Untersuchung möglichst still zu liegen. Den Probanden wurde eine Nothupe mit in den Scanner gelegt, welche die Probanden zum Abbruch des Experiments befähigt hätte, beispielsweise bei klaustrophobischen Attacken oder anderen unerwarteten Ereignissen. Um das Magnetfeld nicht zu stören, bestand sie aus Kunststoff und übermittelte per Luftdruck das Notsignal.

Die Sätze wurden mit einem Projektor auf eine halbdurchlässige Mattscheibe projiziert, deren Rückseite die Probanden über einen im 45°-Winkel angebrachten Spiegel betrachteten.

2.2.4.2 Versuchsablauf

Die Steuerung der Präsentation der Blöcke und Sätze wurde in beiden Experimenten mit dem Programm ERTS (Experimental Run Time System, Version 3.28, BeriSoft Cooperation, Frankfurt/M.) realisiert. Im ersten Experiment wies vor jedem Block ein Zeichen („M“ oder „S“) darauf hin, ob die im folgenden Block gezeigten Sätze moralisch („M“) oder semantisch („S“) zu beurteilen waren. Im zweiten Experiment wurde das „M“ oder „S“ zusammen mit dem Einführungssatz präsentiert. In der Bedingung „moralisches Urteilen“ folgte auf einen einführenden Satz ein zweiter, zu beurteilender Entscheidungssatz, der entweder moralisch unbedenklichen oder verwerflichen Inhalts war. In der Bedingung „semantisches Urteilen“ war der zweite Satz entweder semantisch korrekt oder inkorrekt. Per Knopfdruck sollten die Probanden darüber entscheiden, ob die präsentierten Handlungen moralisch verwerflich oder akzeptabel waren, bzw. während der Kontrollbedingung, ob die Sätze semantisch korrekt oder inkorrekt waren. Sie wurden dazu angehalten, die Entscheidung möglichst schnell zu treffen, und sofort den entsprechenden Knopf zu drücken. Die Maus bedienten die Probanden mit der rechten Hand. Mit dem Zeigefinger drückten sie auf den linken Knopf, um mit der Entscheidung „semantisch korrekt“, bzw. „moralisch akzeptabel“ zu antworten, mit dem Mittelfinger drückten sie auf den rechten Knopf, um „semantisch inkorrekt“ oder „moralisch verwerflich“ zu signalisieren.

Versuchsablauf des ersten Experiments

Das erste Experiment war in zehn Blöcke gegliedert, fünf in jeder Bedingung. Jeder Block bestand aus 12 Sätzen (entsprechend sechs zu beurteilenden Szenarien in Form von Doppelsätzen). Jeder einzelne Satz wurde jeweils für 3,5 Sekunden gezeigt, so dass jeder Block 42 Sekunden dauerte. Zwischen den Blöcken bestand eine 42 Sekunden dauernde Pause, in der die Probanden zur Verminderung von Augenbewegungen ein zentrales Kreuz fixieren sollten. Die Abfolge der Sätze sowie der Blöcke war pseudorandomisiert.

Insgesamt dauerte die Erhebung der funktionellen Daten während des eigentlichen Experiments etwa 15 Minuten. Zusammen mit der Zeit für die anatomische T1-gewichtete Aufnahme mittels einer FLASH (Fast low angle shot)-Sequenz sowie mit den Zeiten für technische Einstellungen des MRTs, ergab sich eine Gesamtdauer der Liegezeit im MRT von etwa 30-40 Minuten pro Proband. Zu den Details dieser Mess-Sequenzen siehe nachfolgendes Kapitel 2.2.5.

Im Anschluss an die Messungen wurden die Probanden hinsichtlich der Schwierigkeit der semantischen und der moralischen Bedingung befragt, wobei hier lediglich beurteilt werden sollte, welche Bedingung in ihrer Gesamtheit schwieriger zu beurteilen war, bzw. ob es keinen Unterschied gab. Eine Einschätzung des Schwierigkeitsgrades einzelner Sätze erfolgte nicht.

Versuchsablauf des zweiten Experiments

Das zweite Experiment bestand aus 120 Szenarien in Form von Doppelsätzen, die in pseudorandomisierter Abfolge präsentiert wurden. Der Einführungs- und der Entscheidungssatz wurden jeweils 3,5 Sekunden lang, direkt aufeinander folgend gezeigt. Die zwischen den Doppelsätzen auftretende Pausenlänge (Interstimulus-Intervall) variierte zwischen zwei und zwölf Sekunden und lag im Durchschnitt bei sieben Sekunden. Auch hier sollten die Probanden während der Pausen ein Kreuz in der Mitte der Mattscheibe fixieren. Die optimierte Verteilung unterschiedlicher Pausenlängen machte eine durchschnittliche Verringerung der Pausenlängen möglich (Dale, 1999) und dadurch eine Verkürzung des gesamten Experiments, um die Konzentrationsfähigkeit der Probanden nicht zu überfordern.

Die funktionelle Messung dauerte insgesamt etwa 28 Minuten. Zusammen mit den Zeiten für die anatomische FLASH-Aufnahme sowie Zeiten für die technischen Einstellungen, ergab sich eine Gesamtdauer der Liegezeit im MRT von etwa 40-50 Minuten pro Proband.

Im Anschluss an die Messungen beurteilten die Probanden auf einem Fragebogen jeden einzelnen Satz hinsichtlich des Schwierigkeitsgrads, Grad des Unmoralischen und Grad der im Satz vorliegenden Emotionalität. Hierzu diente eine Skala von eins (sehr einfach / gar nicht

unmoralisch / sehr schwach emotional) bis zehn (sehr schwierig / sehr unmoralisch / sehr emotional).

2.2.5 FMRT-Datenaquisition

Zur Aufnahme der MRT-Daten wurde ein Siemens Magnetom Vision Scanner (Erlangen, Deutschland) mit einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla benutzt.

Zunächst wurde eine Übersichtsaufnahme („Scout“) angefertigt. Sie umfasst eine koronare, eine sagittale und eine transversale Schicht und dient zur Orientierung und Anpassung der folgenden Messungen. Diese konnten hierdurch mittels der sagittalen Schicht parallel zur Linie zwischen vorderer und hinterer Kommissur orientiert werden.

Während der funktionellen Aufnahme wurden echoplanare (EPI) T2*-gewichtete, BOLD-Kontrast-abhängige Bilder gewonnen. Die ersten sechs Bilder wurden verworfen, da die ersten Bilder einer EPI-Sequenz generell eine zu hohe Signalintensität aufweisen. Diese Aufnahmen dienten somit nur der Aufsättigung bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes im Magnetfeld.

2.2.5.1 Datenaquisition im ersten Experiment

Es wurden insgesamt 220 Bilder im zeitlichen Abstand von 4,2 Sekunden erstellt (30 axiale Schichten mit 3 mm Schichtdicke und 4 mm² in-plane-Auflösung mit einer Echozeit (TE) von 60 ms, der Kippwinkel des Anregungsimpulses (Flip-Winkel) betrug 90⁰, eine verschachtelte Abfolge der Schichtaufnahmen diente der Vermeidung einer zeitlichen Verschiebung zwischen oberen und unteren Schichten, das Sichtfeld (FOV) betrug 256 x 256 mm, mit einer Auflösung von 64 x 64 Pixeln (matrix), der Abstand zwischen den Schichten („interslice gap“) betrug 0,45 mm).

Um einen systematischen Fehler durch ein sogenanntes „sampling over peristimulus time“ (Price et al., 1999; Veltman et al., 2002) zu vermeiden, wurden die Bilder asynchron zur Satzpräsentation aufgenommen, in jedem Block mit zwölf Sätzen wurden zehn Bilder aufgezeichnet. Auf die funktionelle Messung folgte eine anatomische Messung mit hochauflösenden T1-gewichteten Bildern in Form einer FLASH (Fast low angle shot)-Sequenz. Diese Sequenz bestand aus 180 Schichten, die 1 mm dick waren und parallel zu der Linie zwischen anteriorer und posteriorer Kommissur angeordnet wurden, mit einer Matrix von 256 x 256 Pixeln und einem Sichtfeld von 256 x 256 mm, einer TR von 20 ms und einer TE von 5 ms, bei einem Kippwinkel von 30°.

2.2.5.2 Datenaquisition im zweiten Experiment

In diesem Experiment wurden pro Proband 406 Bilder im zeitlichen Abstand von 4,2 Sekunden aufgenommen (40 axiale Schichten mit 3 mm Schichtdicke und 4 mm² in-plane-Auflösung mit einer Echozeit von 30 ms, der Kippwinkel des Anregungsimpulses betrug 90⁰, aufsteigende Abfolge der Schichtaufnahmen, das Sichtfeld betrug 256 x 256 mm, mit einer Matrix von 64 x 64 Pixeln, der Abstand zwischen den Schichten betrug 0,45 mm).

Wie im ersten Experiment folgte auf die funktionelle Messung eine anatomische Messung mit hochauflösenden T1-gewichteten Bildern in Form einer FLASH-Sequenz. Deren technische Daten sind dem vorigen Abschnitt zum ersten Experiment zu entnehmen.

2.2.6 FMRT-Datenanalyse

Datenanalyse des ersten Experiments

Die Datenanalyse wurde mit dem kommerziellen Programm Brain-Voyager (Maastricht, Niederlande, <http://www.brainvoyager.com>) durchgeführt. Die Vorverarbeitung der Daten beinhaltete eine 3D-Bewegungskorrektur, eine Aquisitionszeitkorrektur, die Korrektur linearer Trends sowie eine zeitliche und räumliche Glättung. Durch Koregistrierung wurden die funktionellen Daten auf die anatomischen Daten angepasst. Anschließend wurden die Daten nach dem Referenzgehirn nach Tournoux und Talairach normalisiert. Anhand der Transformationsparameter wurden anschließend die funktionellen EPI-Daten ebenfalls in den standardisierten Talairachraum übertragen. Eine Multiple Regressionsanalyse der Zeitläufe, inklusive Autokorrelationskorrektur, wurde mit dem Allgemeinen Linearen Modell durchgeführt. Hierzu wurde die Analyse mit gemischten Effekten verwandt, um die Ergebnisse auf die Population verallgemeinern zu können, aus der die Stichproben stammten. Als Referenzfunktionen beinhaltete das Model für jede der beiden Stimulationsbedingungen (moralisches Urteilen und semantisches Urteilen) jeweils eine um vier Sekunden zeitverschobene, an die Blutflussantwortfunktion angepasste sogenannte „Box-car-Function“. Statistische Karten wurden für jede Bedingung und jeden Probanden sowie als Gruppenanalyse errechnet. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse wurde eine Kortex-Rekonstruktion durch Segmentierung und Entfaltung des Kortex durchgeführt.

Statistische Unterschiede (T-Statistik) zwischen beiden Bedingungen wurden als Kontrast-Karten dargestellt, bei einem Schwellenwert von p kleiner als 0,005 (unkorrigiert) und einer minimalen Clustergröße von 150 mm^3 . Die Signalzeitverläufe in den Voxeln eines Clusters, die statistisch signifikante Signalanstiege zeigten, wurden über die zum Cluster gehörenden Voxel, wie auch über die Probanden gemittelt. So wurde für die aktivierten Areale jeweils ein durchschnittlicher Signalzeitverlauf berechnet und als Diagramm dargestellt.

Datenanalyse des zweiten Experiments

Die fMRT-Daten-Analyse erfolgte mit dem Programm „FEAT“ (FMRI Expert Analysis Tool, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/analysis/research/feat/>) Version 5.00, ein fMRT-Analyse-Programm der „FSL“ (FMRIB's Software Library, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/fsl>). Die Vorverarbeitung der Daten umfasste die Aquisitionszeitkorrektur (durch AFNI, <http://afni.nimh.nih.gov> (Cox, 1996)), Bewegungskorrektur durch „MCFLIRT“ (Jenkinson et al., 2002), Beseitigung der nicht zum Gehirn gehörenden Voxel durch „BET“ (Smith, 2002), räumliche Glättung mittels eines Gauss'schen Kernels von 12 mm FWHM, Signalintensitätsnormalisierung aller Voxel; zeitliche Glättung mittels eines Hochpassfilters ($\text{Sigma} = 50,0 \text{ s}$). Die ALM-Analyse der Signalzeitverläufe sowie die Autokorrelationskorrektur (Woolrich et al., 2001) wurde mittels „FILM“ (FMRIB's Improved Linear Model), einer Komponente von „FEAT“, durchgeführt. FSL wurde von der Analysis Group, des „Oxford Centre for Functional Magnetic Resonance Imaging of the Brain“ entwickelt. Zur Übersicht über FSL und die Komponenten FEAT, FILM, FLIRT, BET siehe auch: (Smith et al., 2004). Es wurden die Referenzfunktionen der vier Bedingungen anhand des zeitlichen Auftretens der Entscheidungssätze (in Form einer an die Blutflussantwortfunktion sogenannten „Box-car-Function“) gebildet. Um Beeinflussungen durch die Einführungssätze auszuschließen, wurde deren zeitlicher Verlauf als weiterer Regressor in das Modell aufgenommen. Ebenso wurden die Antwortzeiten der Probanden als zusätzlicher Regressor (in Form einer parametrischen Funktion der Antwortzeiten zu jeder einzelnen Entscheidung) in das Modell aufgenommen, um deren eventuellen Einfluss auf das BOLD-Signal zu kontrollieren. Da bei einem Probanden aufgrund eines Kabeldefekts keine Antwortzeiten vorlagen, und somit auch kein Antwortzeit-Regressor für diesen Probanden zu erstellen war, wurden auch dessen MRT-Daten von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Kontrastkarten wurden für jede Bedingung und jeden Probanden errechnet, und anschließend in ein räumliches Standardsystem transformiert (Referenzgehirn ICBM 152, Montreal Neurological Institute). Die Gruppenanalyse wurde mit einer Analyse mit gemischten Effekten durchgeführt, und statistische Karten wurden mit einem unkorrigierten Schwellenwert von $p < 0,001$ (entsprechend einem $Z > 3,1$) und einer minimalen Clustergröße von fünf Voxeln ermittelt. Weiterhin wurde eine Region-of-interest(ROI)-Analyse, welche die BOLD-Antwort nur in einem definierten Gebiet betrachtet, in den Amygdalae mit einem verhältnismäßig geringen Schwellenwert von $p < 0,05$ (unkorrigiert) durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse des ersten Experiments

3.1.1 Verhaltensdaten des ersten Experiments

Die Antwortzeiten wurden definiert als die Zeit vom Erscheinen des Entscheidungssatzes bis zum Knopfdruck des Probanden. Die Probanden wurden aufgefordert, möglichst schnell und korrekt zu antworten. Beim Vergleich der Antwortzeiten mittels des gepaarten T-Tests zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen (Moralisches Urteilen, Semantisches Urteilen). Die Antwortzeiten waren in der moralischen Bedingung kürzer (Mittelwert = 2084 ms, Standardabweichung = 125 ms, $p < 0,05$, gepaarter T-Test) als in der semantischen (2310 ± 228 ms) (vgl. Abb. 13).

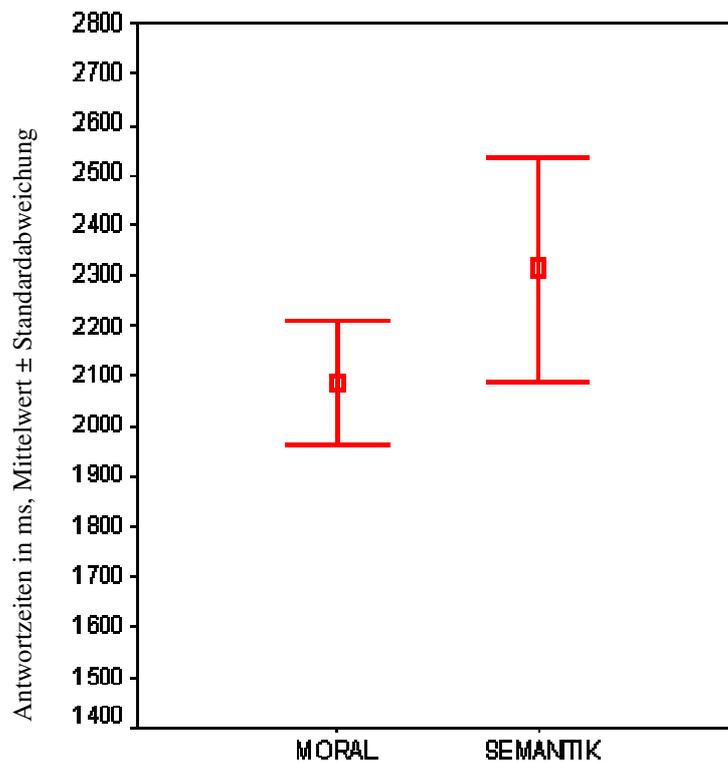


Abbildung 13: Antwortzeiten (in ms) 1.Experiment

Die direkt auf den Versuch erfolgte Befragung der Probanden hinsichtlich der Aufgabenschwierigkeit zeigte eine höhere Einschätzung der Schwierigkeit in der semantischen Bedingung. Sechs von acht Probanden schätzten die semantische Bedingung als schwieriger ein als die moralische, während zwei Probanden keinen Unterschied im Schwierigkeitsgrad fanden.

3.1.2 FMRT-Daten des ersten Experiments

3.1.2.1 Statistische Karten der aktivierten Regionen

Die Mixed-Effects-Gruppenanalyse zeigte signifikant höhere Anstiege des BOLD-Signals während der moralischen Bedingung im Vergleich zur semantischen Bedingung in einem Netzwerk, das sich vor allem auf frontale und temporale Bereiche verteilt. Aktivierungen im Temporallappen zeigten sich im linken posterioren Sulcus temporalis superior (BA39), im linken Gyrus temporalis medialis (BA21) und beidseitig im Gyrus temporalis superior der temporalen Pole (BA38). Im Frontallappen waren dies der linke laterale Präfrontalkortex (BA47), der rechte mediale Präfrontalkortex (BA9/10) und beidseitig der ventromediale Präfrontalkortex (BA10). Außerdem zeigte sich im rechten Cuneus (BA 17/18) eine vermehrte Aktivität (siehe Abb.14). Im unteren Teil der Abbildung sind einige der Aktivierungen auf sagitalen und transversalen Schnittbildern dargestellt.

In Tabelle 4 sind die Größe der bei $p < 0,005$ signifikanten Regionen und die Lokalisation der Schwerpunkte der Aktivierungen als Talairach Koordinaten angegeben.

Ein höherer Anstieg des BOLD-Signals in der semantischen gegenüber der moralischen Bedingung wurde im dorsolateralen Präfrontalkortex beidseitig (BA 46), im rechten präzentralen Gyrus sowie im linken Nucleus caudatus festgestellt (siehe Abb. 14: blau-grüne Aktivierungen sowie Tabelle 5).

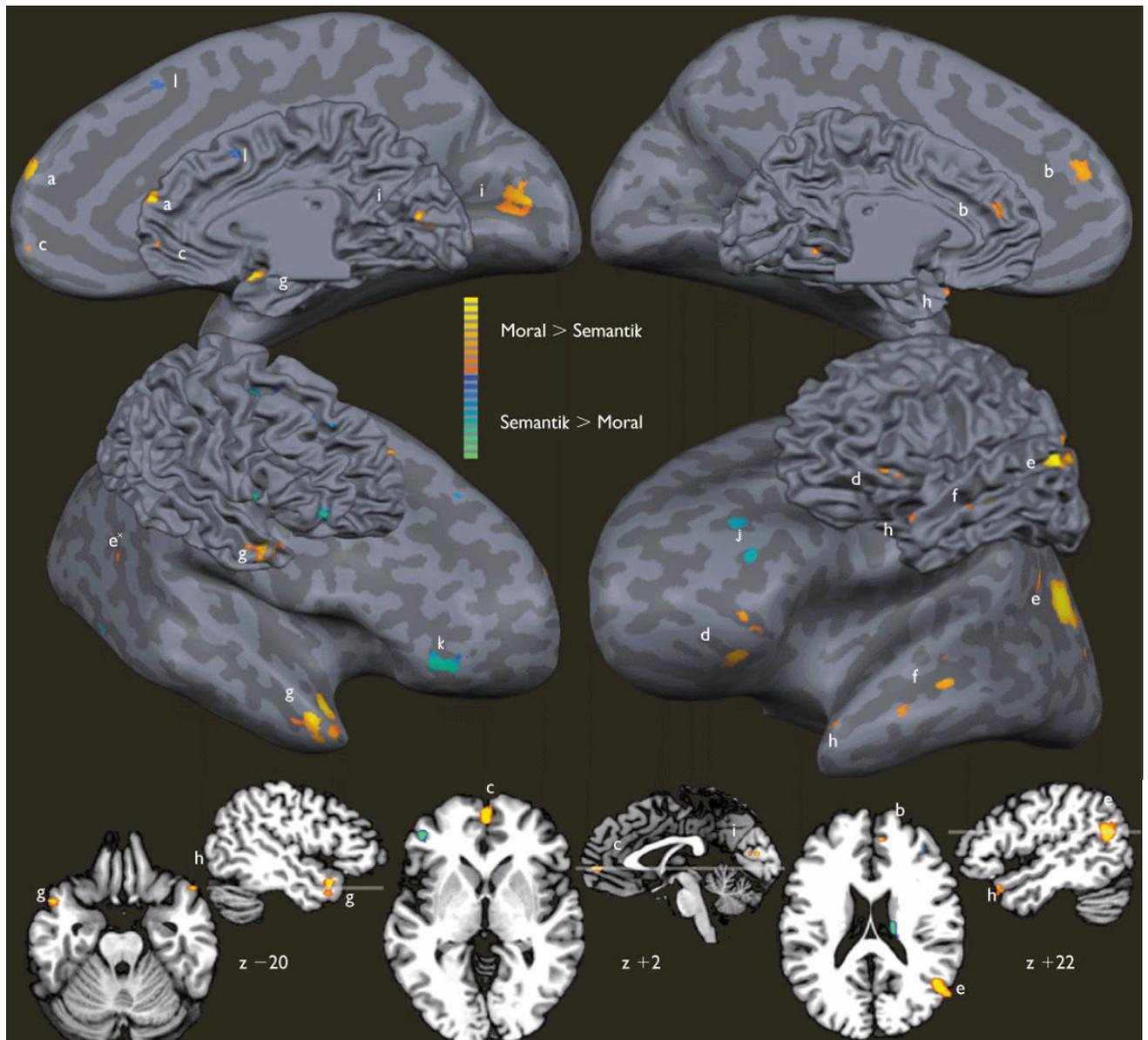


Abbildung 14: Gehirnregionen, welche beim Vergleich der Verarbeitung einfacher moralischer Entscheidungen gegenüber der Verarbeitung semantischer Urteile einen signifikanten Unterschied in ihrer Aktivität zeigten. Die Resultate der Gruppenanalyse sind auf eine entfaltete repräsentative anatomische Aufnahme (template „Colin“ des Montreal Neurological Institute) projiziert und im unteren Teil als Schnittbilder dargestellt - „z“ bezeichnet hier die Höhe des transversalen Schnittes bezogen auf das Talairach-Koordinatensystem. Die dunkelgrauen Regionen stellen Sulci dar, die hellen Regionen zeigen die Gyri. Orange bis gelbe Regionen zeigen eine stärkere Aktivierung in der moralischen Bedingung als in der semantischen. Grüne bis blaue Regionen zeigen eine stärkere BOLD-Antwort in der semantischen im Gegensatz zur moralischen Bedingung. Der Schwellenwert der Mixed-effects-Analyse wurde auf $p < 0,005$ unkorrigiert festgelegt.

1. Exp.: Vergleich: Moralisches Urteil > Semantisches Urteil									
	Region	links/ rechts	BA	mm ³	Talairach Koordinaten				
					x		y		z
a	Gyrus Frontalis Superior, medPFC	R	9/10	249	6		61		27
b	Gyrus Frontalis Medialis, vmPFC	L	10	165	-8		45		22
c	Gyrus Frontalis Medialis, vmPFC	R	10	335	1		55		2
d	Gyrus Frontalis Medialis, latPFC	L	47	317	-42		34		-6
e	Posteriorer Sulcus Temporalis Superior	L	39	1307	-49		-59		21
e*	Posteriorer Sulcus Temporalis Superior	R	39	132	-37		-68		18
f	Anteriorer Gyrus Temporalis Medialis	L	21	161	-53		-16		-8
g	Gyrus Temporalis Superior, Temporalpol	R	38	621	45		9		-17
h	Gyrus Temporalis Superior, Temporalpol	L	38	151	-49		18		-20
i	Cuneus	R	17/18	487	7		-78		14

p < 0,005 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal; vm= ventromedialer; lat= lateraler; med= medialer; dl= dorsolateraler; PFC= Präfrontalkortex, bei minimaler Clustergröße = 150 Voxel, (e*: = Cluster < 150 Voxel)

Tabelle 4: Aktivierungsänderungen während des Moralischen Urteilens relativ zum Semantischen Urteilen

1. Exp.: Vergleich: Semantisches Urteil > Moralisches Urteil									
Region	links/ rechts	BA	mm ³	Talairach Koordinaten					
				x		y		z	
j	Gyrus Frontalis Medialis, dlPFC	L	46	216	-40		37		18
k	Gyrus Frontalis Inferior, dlPFC	R	46	215	43		41		4
l	Präzentraler Gyrus	R	6	244	28		-9		51
m	Nucleus Caudatus	L		393	-17		-23		19

p < 0,005 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal; vm= ventromedialer; lat= lateraler; med= medialer; dl= dorsolateraler; PFC= Präfrontalkortex

Tabelle 5: Aktivierungsänderungen während des Semantischen Urteilens relativ zum Moralischen Urteilen

3.1.2.2 Signal-Zeitverläufe der aktivierten Regionen

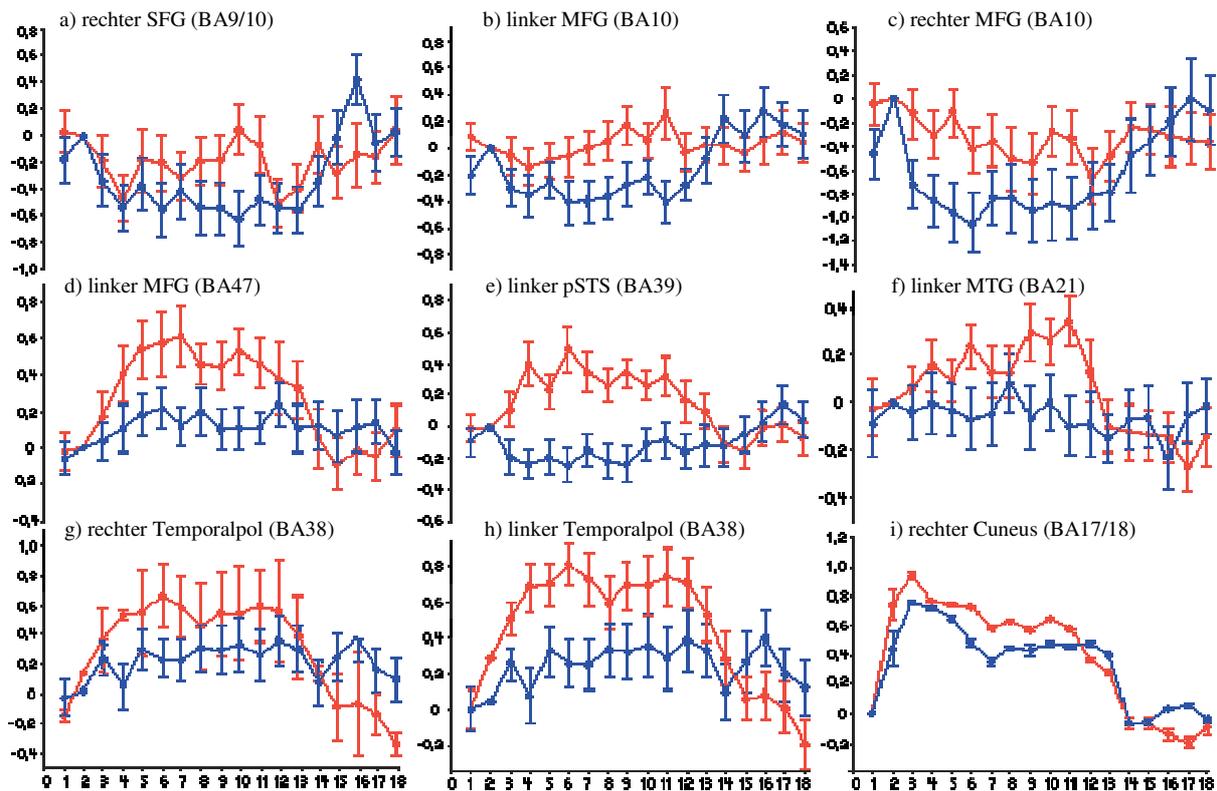


Abbildung 15: Signal-Zeitverläufe (rot: Moralisches Urteilen, blau: Semantisches Urteilen). Die Y-Achse stellt die prozentualen Änderungen des BOLD-Signals in Regionen, in denen die moralische Bedingung zu einer stärkeren Aktivität führte als die semantische (bei einem unkorrigierten $p < 0,005$ und minimaler Clustergröße von 150 Voxeln) dar. Die X-Achse bezeichnet die Abfolge der T2*-Aufnahmen nach Beginn des Entscheidungssatzes.

Abbildung 15 zeigt die durchschnittlichen Zeitverläufe des BOLD-Signals in solchen Regionen, in denen die moralische Bedingung zu einer stärkeren Aktivität führte als die semantische. Während sich im fronto-temporalen Netzwerk eine Steigerung der BOLD-Antwort auf die moralische Bedingung, nicht aber auf die semantische Bedingung zeigte (d-h in Abb. 15), führten im rechten Cuneus beide Bedingungen zu einem Anstieg (i in Abb. 15). Im Bereich des medialen präfrontalen Kortex (a-c in Abb. 15) kommt es zu einem Abfall des BOLD-Signals während des semantischen Urteilens; die moralische Bedingung zeigt einen deutlich geringeren Abfall (a, c in Abb. 15) oder führt zu einem leichten Anstieg (b in Abb. 15).

3.2 Ergebnisse des zweiten Experiments

3.2.1 Verhaltensdaten des zweiten Experiments

3.2.1.1 Antwortzeiten

Als Antwortzeiten wurden für die vier Bedingungen folgende Zeiten ermittelt (vgl. Abb. 16): 1907 ± 436 ms (Mittelwert \pm Standardabweichung) für die erste Bedingung „Moralisches Urteilen mit Gewaltszenarien“, 2087 ± 358 ms (Mittelwert \pm Standardabweichung) für die zweite Bedingung „Moralisches Urteilen ohne Gewaltszenarien“, 2173 ± 295 ms (Mittelwert \pm Standardabweichung) für die dritte Bedingung „Semantisches Urteilen mit Gewaltszenarien“ und 2277 ± 263 ms (Mittelwert \pm Standardabweichung) für die vierte Bedingung „Semantisches Urteilen ohne Gewaltszenarien“. Moralische Urteile wurden somit schneller gefällt als semantische, sowohl in Anwesenheit von Gewalt ($p = 0,003$, gepaarter T-Test, Bonferronikorrektur), als auch in Abwesenheit von Gewalt ($p = 0,01$, alpha 0,0083). Die Anwesenheit von Gewalt führte zu einer Reduktion der Antwortzeiten sowohl im moralischen ($p = 0,004$), als auch im semantischen Urteil ($p = 0,004$).

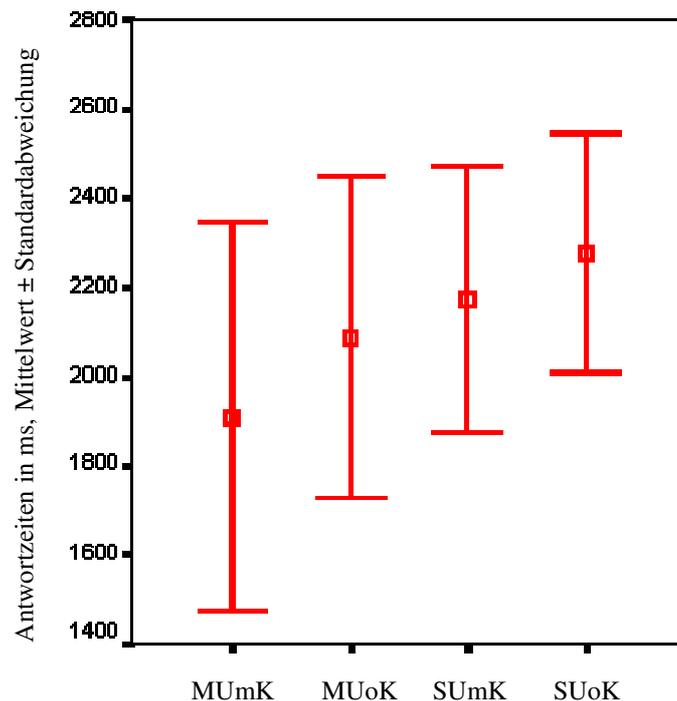


Abbildung 16: Antwortzeiten (in ms) 2. Experiment - MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

3.2.1.2 Fragebogen zum Grad der Schwierigkeit, Unmoral und Emotionalität

Beim Vergleich der Einschätzungen der Schwierigkeit ließen sich im Wilcoxon-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Bedingungen feststellen. Vergleich zwischen: MUmK und MUoK: $p < 0,680$; MUmK und SUmK: $p < 0,750$; MUmK und SUoK: $p < 0,442$; MUoK und SUmK: $p < 0,180$; MUoK und SUoK: $p < 0,414$; SUmK und SUoK: $p < 0,109$ (vgl. Abb. 17 und Tab. 6).

	MUmK	MUoK	SUmK	SUoK
Mittelwert	1,79	1,63	1,75	1,46
Median	1,25	1,00	1,00	1,00
Standardabweichung	1,01	1,03	1,06	0,94
Standardfehler	0,29	0,30	0,30	0,27

Tabelle 6: Einschätzung der Schwierigkeit auf einer Skala von 1 (sehr einfach) bis 10 (sehr schwierig). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

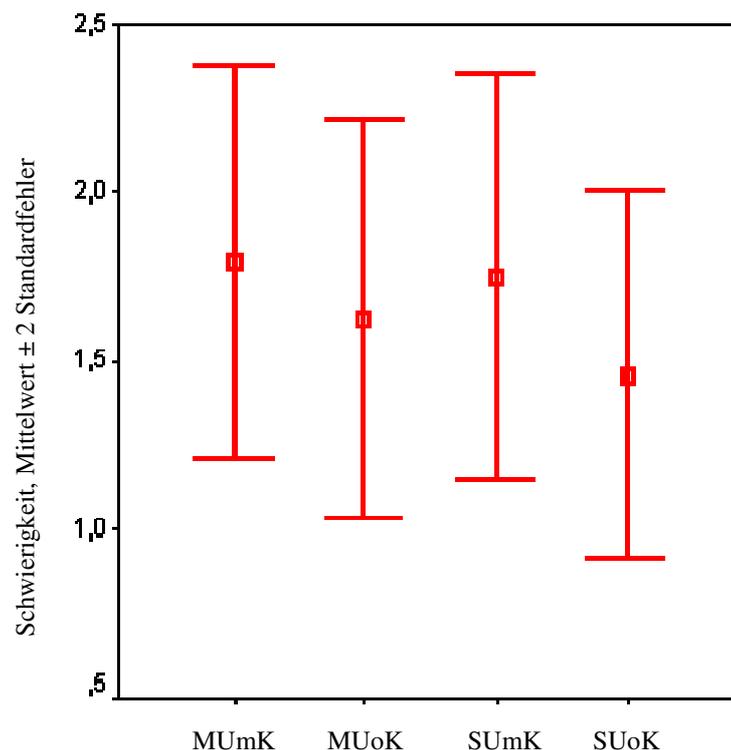


Abbildung 17: Einschätzung der Schwierigkeit auf einer Skala von 1 (sehr einfach) bis 10 (sehr schwierig). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Von besonderem Interesse bezüglich der Emotionalität war der Vergleich zwischen Sätzen mit Gewalt und solchen ohne Gewalt. Hier zeigten sich folgende signifikante Unterschiede:

Einschätzungen der Emotionalität waren in den Sätzen mit Gewalt insgesamt höher, sowohl in der moralischen Bedingung ($p = 0,005$, nicht-parametrischer Wilcoxon Test, Bonferronikorrektur), als auch in der semantischen ($p = 0,007$) (vgl. Abb. 18 und Tab. 7).

	MUmK	MUoK	SUmK	SUoK
Mittelwert	5,08	2,42	3,04	1,33
Median	5,50	2,50	3,00	1,00
Standardabweichung	2,12	1,24	1,67	0,65
Standardfehler	0,61	0,36	0,48	0,19

Tabelle 7: Einschätzung der Emotionalität auf einer Skala von 1 (sehr schwach emotional) bis 10 (sehr emotional). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

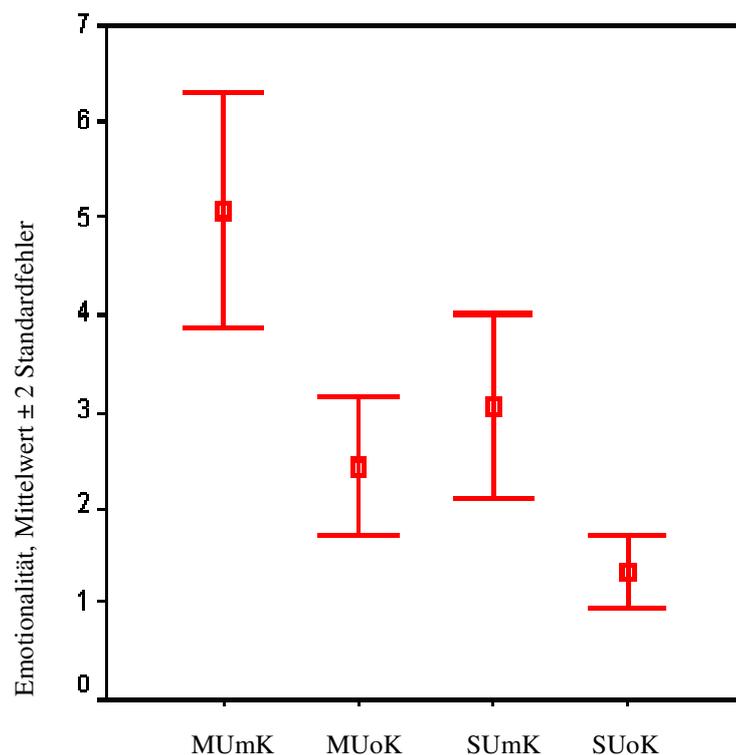


Abbildung 18: Einschätzung der Emotionalität auf einer Skala von 1 (sehr schwach emotional) bis 10 (sehr emotional). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Das Vorliegen von Gewalt hatte keinen Einfluss auf die Einschätzung des Grades der moralischen Verwerflichkeit während des semantischen Urteilens ($p = 0,180$), wohl aber während des moralischen Urteilens ($p = 0,002$) (vgl. Abb. 19 und Tab. 8).

	MUmK	MUoK	SUmK	SUoK
Mittelwert	3,92	2,17	1,25	1,00
Median	3,50	2,00	1,00	1,00
Standardabweichung	1,02	0,86	0,62	0,00
Standardfehler	0,29	0,25	0,18	0,00

Tabelle 8: Einschätzung des Grades der moralischen Verwerflichkeit auf einer Skala von 1 (gar nicht unmoralisch) bis 10 (sehr unmoralisch). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

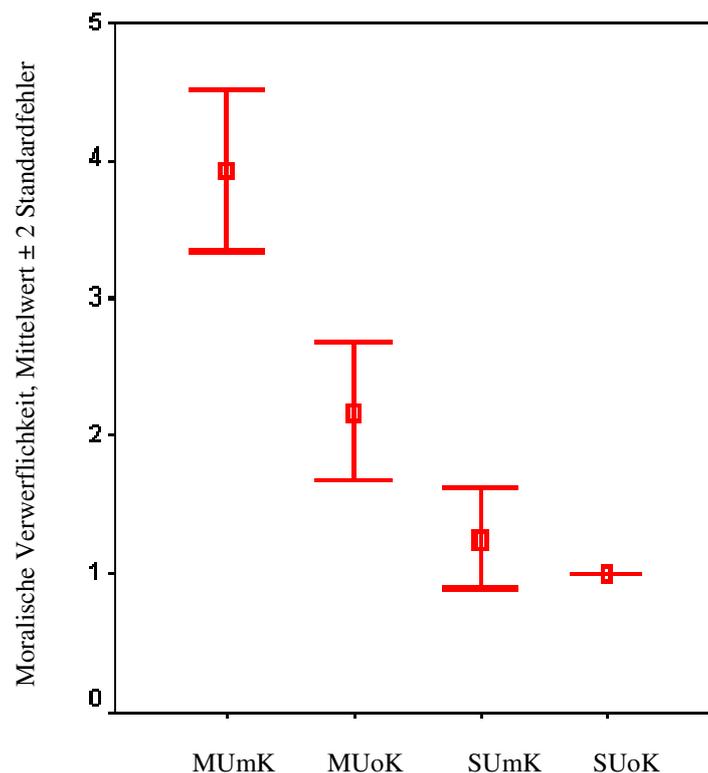


Abbildung 19: Einschätzung des Grades der moralischen Verwerflichkeit auf einer Skala von 1 (gar nicht unmoralisch) bis 10 (sehr unmoralisch). MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

3.2.2 FMRT-Daten des zweiten Experiments

3.2.2.1 Vergleich moralisches Urteilen gegen semantisches Urteilen

Wie im ersten Experiment zeigte auch im zweiten Experiment ein fronto-temporales Netzwerk eine stärkere BOLD-Antwort im Vergleich der moralischen gegenüber der semantischen Bedingung. Dies umfasste beidseitig den Gyrus temporalis medialis / Temporalpol, den ventromedialen Präfrontalkortex (BA 10/11) und den posterioren Sulcus temporalis superior sowie rechtseitig den posterioren Gyrus cinguli und den medialen Präfrontallappen (BA 9). Siehe hierzu die Abbildungen 20 und 21 sowie Tabelle 9.

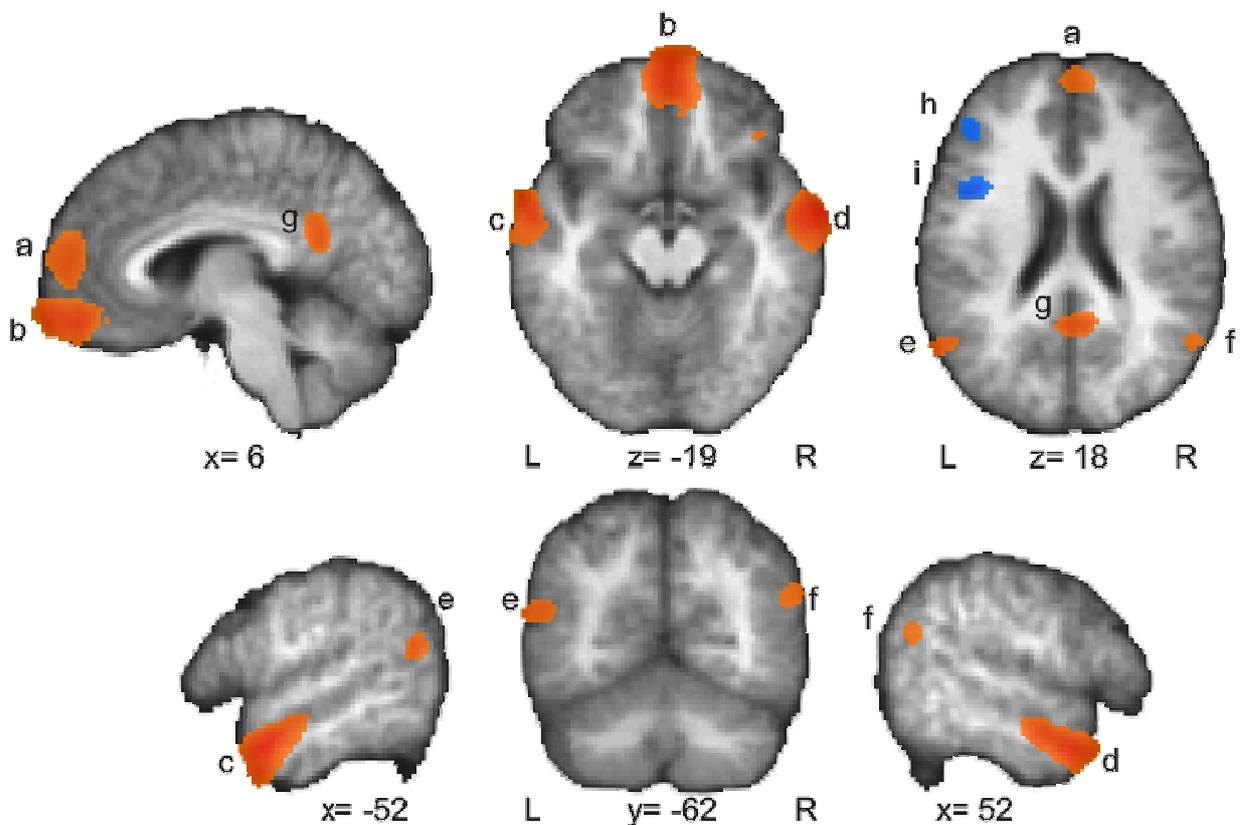


Abbildung 20: Haupteffekt „Moralisches Urteilen / Semantisches Urteilen“; Gruppenanalyse mit elf Probanden ($p < 0,001$, unkorrigiert, Mixed-effects-Analyse), dargestellt auf einer Mittelung der anatomischen T1-Aufnahmen aller Probanden. Dabei zeigt die farbliche Kodierung eine Mehraktivierung in der moralischen Bedingung durch orange gefärbte Pixel, während die blauen Pixel einer Mehraktivierung in der semantischen Bedingung entsprechen. Nicht dargestellt ist die Aktivierung im Gyrus supramarginalis während der semantischen Bedingung.

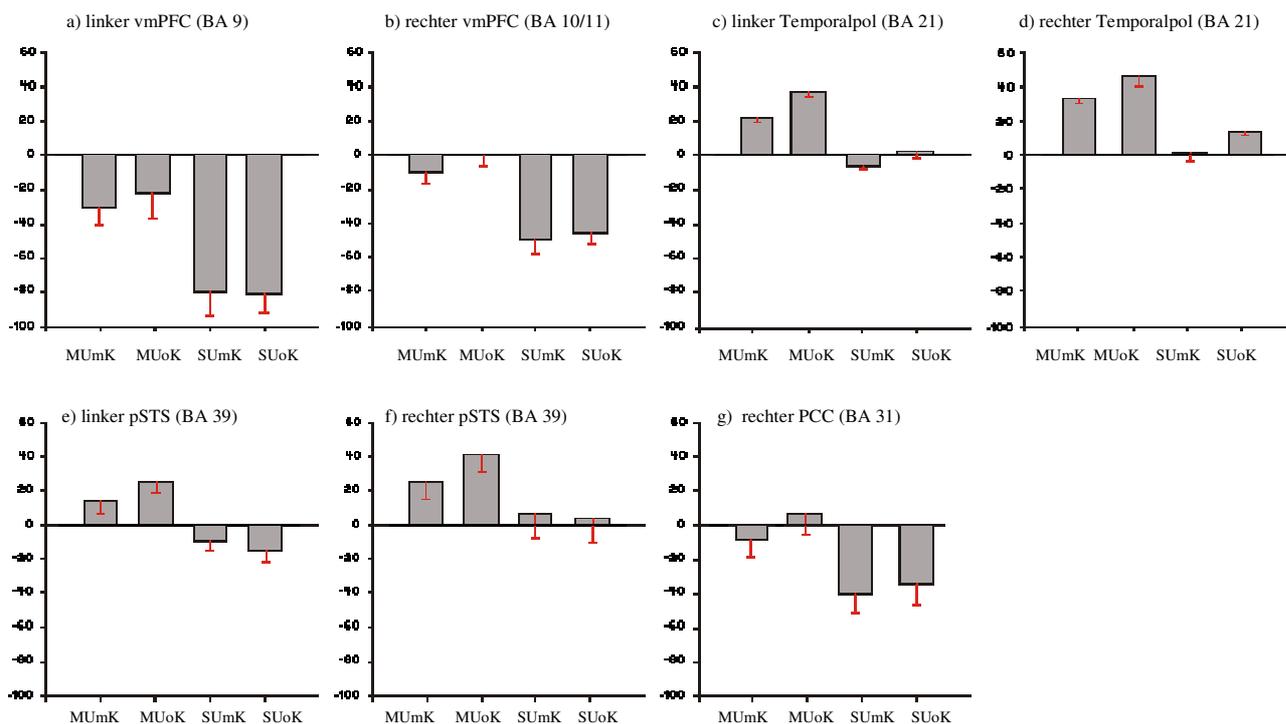


Abbildung 21: Signalveränderungen in den aktivierten Regionen im Vergleich des Moralischen Urteilens mit dem semantischen Urteilen. Die Diagramme zeigen die durchschnittlichen Signalveränderungen (in 100stel Prozent und Standardfehler) in den Regionen, welche beim moralischen Urteilen mehr Aktivität zeigten als beim semantischen Urteilen. MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Ein stärkerer Anstieg des BOLD-Signals während des semantischen Urteilens gegenüber dem moralischen zeigte sich linksseitig im Gyrus frontalis medialis (dlPFC, BA 46), im Gyrus supramarginalis (BA 40), und in der Insula (BA 13) (siehe blaue Aktivierungen in der Abb. 20 sowie Tabelle 10).

2. Exp.: Vergleich: Moralisches Urteil > Semantisches Urteil							
	Region	links/ rechts	BA	MNI-Koordinaten			
				x		y	z
a	Medialer Präfrontallappen / medPFC	R	9	3		58	12
b	Medialer Präfrontallappen / vmPFC	L	10/11	-6		54	-14
		R		4		55	-8
c	Gyrus temporalis medialis / Temporalpol	L	21	-54		5	-26
		R		55		7	-24
e	Posteriorer Sulcus temporalis superior	L	39	-56		-62	18
		f		R	58		-60
g	Posteriorer Gyrus cinguli	R	31	6		-50	26

p < 0,001 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal; med= medialer ; vm= ventromedialer; dl= dorsolateraler; PFC=präfrontaler Kortex ;

Tabelle 9: Aktivierungen im zweiten Experiment – Vergleich des Moralischen Urteils mit dem Semantischen Urteil

2. Exp.: Vergleich: Semantisches Urteil > Moralisches Urteil							
	Region	links/ rechts	BA	MNI-Koordinaten			
				x		y	z
h	Gyrus frontalis medialis, dlPFC	L	46	-42		40	18
i	Insula	L	13	-41		9	20
j	Gyrus supramarginalis	L	40	-42		-42	36

p < 0,001 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal; med= medialer ; vm= ventromedialer; dl= dorsolateraler; PFC=präfrontaler Kortex ;

Tabelle 10: Aktivierungen im zweiten Experiment – Vergleich des Semantischen Urteils mit dem Moralischen Urteil

3.2.2.2 Vergleich der Bearbeitung von Szenarien mit Körperverletzung gegen Szenarien ohne Körperverletzung

Beim Vergleich der Bearbeitung von Szenarien mit Körperverletzung gegenüber Szenarien ohne Körperverletzung zeigte sich in keiner Hirnregion ein stärkerer BOLD-Signalanstieg während der Präsentation von körperlicher Gewalt. Umgekehrt war allerdings während der gewaltfreien Szenarien eine stärkere BOLD-Antwort beidseitig im temporalen Pol zu beobachten, wobei der linke temporale Pol eine schwächere BOLD-Antwort zeigte, als der rechte. Die Ergebnisse der Gruppenanalyse mit elf Probanden ($Z > 2,6$, entsprechend einem $p < 0,005$, unkorrigiert; Mixed-effects-Analyse) sind auf einer Überlagerung der elf anatomischen T1-Aufnahmen dargestellt. Dabei zeigt die farbliche Kodierung eine Mehraktivierung während der Szenarien ohne Körperverletzung relativ zu den Szenarien mit Körperverletzung durch orange bis rot gefärbte Pixel (vgl. Abb. 22).

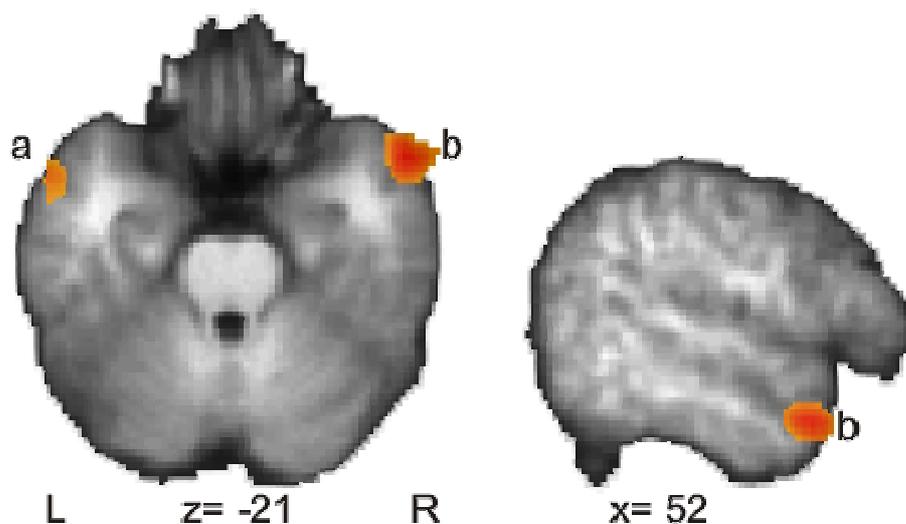


Abbildung 22: Vergleich der Bearbeitung von Szenarien ohne Körperverletzung gegenüber Szenarien mit Körperverletzung, $p < 0,005$ unkorrigiert. Die Mehraktivierung während der Szenarien ohne Körperverletzung relativ zu den Szenarien mit Körperverletzung ist durch orange bis rot gefärbte Pixel dargestellt.

Die Diagramme zeigen die durchschnittlichen Signalveränderungen beidseitig im temporalen Pol, welcher bei gewaltfreien Szenarien eine stärkere BOLD-Antwort zeigte als bei Szenarien mit Gewalt (vgl. Abb. 23 und Tab. 11).

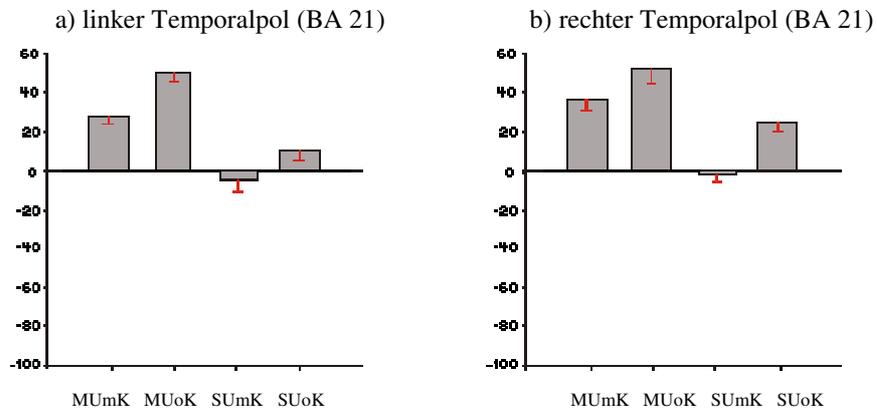


Abbildung 23: Signalveränderungen (in 100stel Prozent und Standardfehler) in Regionen mit einer höheren BOLD-Aktivität bei „Szenarien ohne Gewalt“ gegenüber „Gewaltszenarien“, MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUMK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

2. Exp.: Vergleich: Szenarien ohne Gewalt > Szenarien mit Gewalt							
Region	links/ rechts	BA	MNI-Koordinaten				
			x		y	z	
a	Gyrus temporalis medialis / Temporalpol	L*	21	-56		10	-24
b		R		56		14	-24

p < 0,001 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), * p < 0,005 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal;

Tabelle 11: Aktivierungen im zweiten Experiment: Vergleich der Bearbeitung von Szenarien ohne Körperverletzung gegenüber Szenarien mit Körperverletzung

3.2.2.3 Region-of-interest-Analyse der Amygdalae im Vergleich der Bearbeitung von Szenarien mit Körperverletzung gegen Szenarien ohne Körperverletzung

Da die Rolle der Amygdalae in der Verarbeitung emotionaler Stimuli kontrovers diskutiert wird, und die vorliegenden Ergebnisse in diesem Areal von den Hypothesen abwichen, wurde im Nachhinein eine Region-of-interest(ROI)-Analyse der Amygdalae durchgeführt. Hierbei zeigte sich erst bei einem verhältnismäßig niedrigen Schwellenwert von $Z > 1,7$ (entsprechend einem $p < 0,05$ unkorrigiert) eine BOLD-Signal-Erniedrigung in der linken Amygdala während der Darbietung von Szenarien mit Gewalt (vgl. Abb. 24).

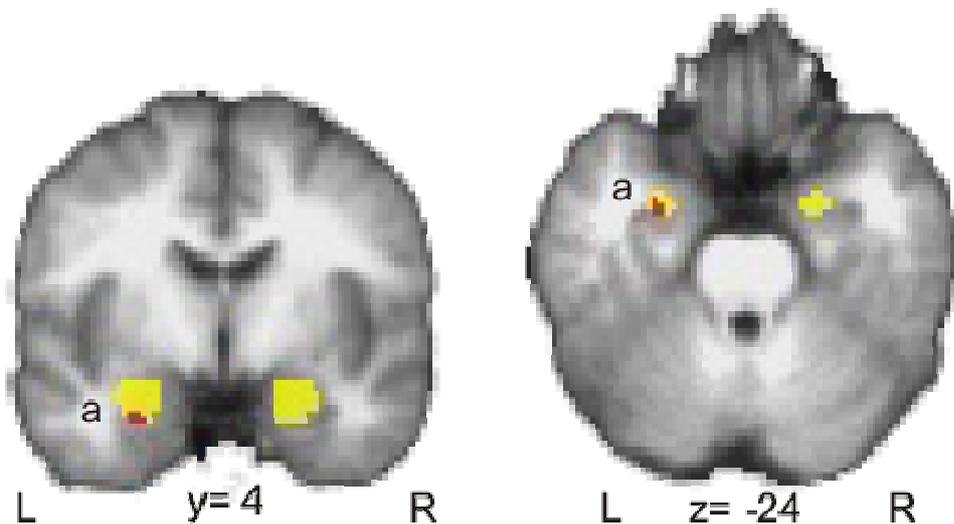


Abbildung 24: ROI-Analyse in der Amygdala, $p < 0,05$ - Vergleich der Verarbeitung von „Szenarien ohne Körperverletzung“ gegenüber „Szenarien mit Körperverletzung“, das als Region-of-interest definierte Areal ist gelb dargestellt, der Bereich, in dem eine höhere BOLD-Antwort in den gewaltlosen Szenarien nachzuweisen war, ist rot dargestellt.

Bei der Region-of-interest-Analyse zeigten sich im Bereich der linken Amygdala folgende Signalveränderungen (vgl. Abb. 25 und Tab. 12):

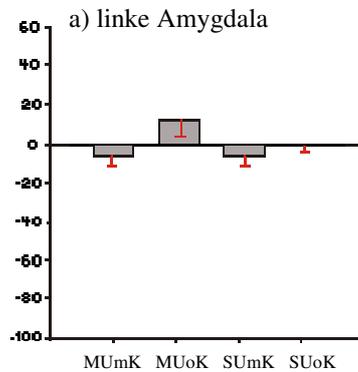


Abbildung 25: Signalveränderung (in 100stel Prozent und Standardfehler) in der linken Amygdala, MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Region-of-interest-Analyse der Amygdalae					
Szenarien ohne Gewalt > Szenarien mit Gewalt					
Region	links/ rechts	MNI-Koordinaten			
		x		y	z
Amygdala	L	25		-4	-24
p < 0,05 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert) als ROI-Analyse der Amygdalae					

Tabelle 12: Aktivierung in der linken Amygdala während Szenarien ohne Gewalt im zweiten Experiment – ROI-Analyse der Amygdalae: Verarbeitung von „Szenarien ohne Körperverletzung“ gegenüber „Szenarien mit Körperverletzung“

3.2.2.4 Analyse der Interaktion beider Haupteffekte

In der Analyse der Interaktion zwischen den beiden Haupteffekten „Moralisches Urteilen / Semantisches Urteilen“ und „Gewaltpräsentation / keine Gewaltpräsentation“, ermittelt durch den Kontrast „(Moralisches Urteilen mit Gewalt - Moralisches Urteilen ohne Gewalt) versus (Semantisches Urteilen mit Gewalt - Semantisches Urteilen ohne Gewalt)“ ließ sich keine Interaktion feststellen. Dies zeigt, dass die Ergebnisse der beiden Haupteffekte voneinander unabhängig sind.

3.2.2.5 Mit der Reaktionszeit kovariierende BOLD-Veränderungen

Bei der Analyse des mit der Reaktionszeit kovariierenden BOLD-Signals stellte sich der dorsolaterale präfrontale Kortex im Gyrus frontalis inferior dar. Die Ergebnisse der Gruppenanalyse der elf Probanden ($Z > 2,6$, entsprechend einem $p < 0,005$, unkorrigiert; Mixed-effects-Analyse), sind auf einer Überlagerung der elf anatomischen T1-Aufnahmen dargestellt (vgl. Abb. 26).

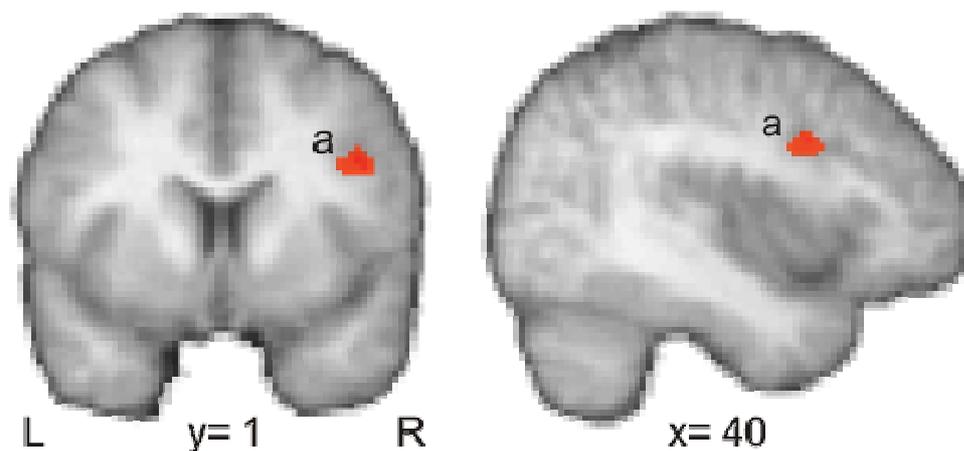


Abbildung 26: Zweites Experiment – die mit der Reaktionszeit kovariierenden BOLD-Veränderungen sind rot dargestellt (11 Probanden, $Z > 2,6$, entsprechend einem $p < 0,005$, unkorrigiert; Mixed-effects-Analyse).

Das Diagramm zeigt die durchschnittlichen Signalveränderungen im rechten dorsolateralen präfrontalen Kortex im Gyrus frontalis inferior, welcher bei der Regressionsanalyse mit den Reaktionszeiten kovarierte (vgl. Abb. 27 und Tab. 13).

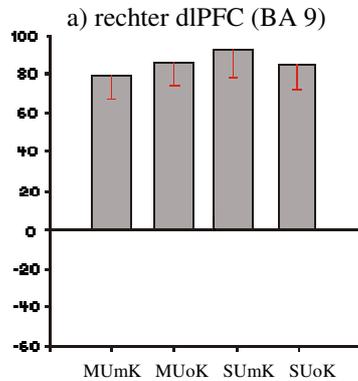


Abbildung 27: Signalveränderungen (in 100stel Prozent und Standardfehler) in Arealen, die mit der Reaktionszeit kovariieren, MUmK: Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, MUoK: Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung, SUmK: Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung, SUoK: Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung

Mit der Reaktionszeit kovariierende BOLD-Veränderungen						
Region	links/ rechts	BA	MNI-Koordinaten			
			x		y	z
Gyrus frontalis inferior, dlPFC	R	9	44		1	32
p < 0,005 (Mixed-effects-Analyse, unkorrigiert), BA= Brodmann Areal; dlPFC= dorsolateraler präfrontaler Kortex						

Tabelle 13: Zweites Experiment – Mit der Reaktionszeit kovariierende BOLD-Veränderungen

3.3 Zu den Hypothesen

3.3.1 Zum ersten Experiment

Beim moralischen Urteilen gegenüber dem semantischen Urteilen zeigt sich, der Hypothese entsprechend, bei Verzicht auf eine Präsentation von Gewalt in den zu beurteilenden Szenarien, eine stärkere Aktivität im Bereich des medialen präfrontalen Kortex und des Sulcus temporalis superior. Es zeigt sich, wie erwartet, keine Aktivierung des posterioren Gyrus cinguli.

3.3.2 Zum zweiten Experiment

Hinsichtlich der Messung der Antwortzeiten zeigen sich wie erwartet schnellere Antwortzeiten als Effekt der Gewaltpräsentation.

Entgegen der gestellten Hypothese zeigen Szenarien mit einer Darbietung körperlicher Gewalt gegenüber Szenarien ohne Darbietung körperlicher Gewalt keine Aktivierung der Amygdalae oder des posterioren Gyrus cinguli. Beim moralischen Urteilen gegenüber dem semantischen Urteilen zeigt sich wie schon im ersten Experiment, eine stärkere Aktivität im Bereich des medialen präfrontalen Kortex oder des Sulcus temporalis superior.

4. Diskussion

Das erste Experiment dieser Arbeit untersuchte den Unterschied in der BOLD-Signal-Antwort während des moralischen und semantischen Urteilens. Die Präsentation der zu beurteilenden Sätze erfolgte in Form eines Blockparadigmas. Ziel des ersten Experiments bestand in der Beantwortung der Frage, ob eine einfache nicht-dilemmatische moralische Entscheidungsfindung unter Ausschluss von direkter körperlicher Gewalt in den zu beurteilenden Szenarien auf den gleichen neuronalen Substraten basiert, wie es in Studien über komplexere (dilemmatische) moralische Entscheidungsfindung und ohne den Ausschluss von körperlicher Gewalt gezeigt wurde. Im zweiten Experiment wurde dagegen gerade dieser Einfluss durch die Darbietung körperlicher Gewalt auf das moralische und semantische Urteil untersucht. Dies geschah in Form eines zwei-faktoriellen Designs im ereigniskorrelierten fMRT-Protokoll, dessen einer Faktor den Unterschied von semantischem zu moralischem Urteilen darstellte, während der andere Faktor die Darbietung von Gewaltszenarien gegenüber Szenarien ohne Gewalt verglich. Als Ergebnis zeigte sich im Kontrast des „Moralischen Urteilens“ gegenüber dem „Semantischen Urteilen“ im ersten, wie auch im zweiten Experiment ein frontotemporales Netzwerk mit Aktivierungen unter anderem im posterioren Sulcus temporalis superior, im temporalen Pol sowie im medialen Präfrontalkortex. Diese Regionen zeigten sich auch schon in vorausgegangenen Studien aktiv. Im zweiten Experiment, beim Vergleich der Bearbeitung von Szenarien, welche direkte körperliche Gewalt enthielten, mit solchen, in denen keine Körperverletzung vorlag, war beidseitig im temporalen Pol während der Szenarien ohne Gewalt ein höheres BOLD-Signal zu verzeichnen.

Bevor die Ergebnisse im Einzelnen und detaillierter diskutiert werden, sollten noch einige allgemeine Punkte erwähnt werden, welche bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden müssen: Ein Kritikpunkt, welcher beiden Experimenten dieser Arbeit entgegengebracht werden könnte, ist, dass alle Probanden entweder Studenten oder Ärzte waren. Hiermit ist von einem überdurchschnittlichen Bildungs- und Intelligenzniveau auszugehen, was einen Einfluss auf das moralische Urteil haben könnte. Es wurde bei der Wahl der Versuchspersonen auch keine Berücksichtigung des Geschlechts vorgenommen (es überwiegen männliche Probanden - erstes Experiment: 7:1, zweites Experiment: 10:2). Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden jedoch in der Moralpsychologie diskutiert (Gilligan, 1982) und auch Emotionen betreffende fMRT-Studien (Bremner et al., 2001; Canli et al., 2002) zeigten unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit vom Geschlecht, wie auch von Persönlichkeitsfaktoren (Canli et al., 2001).

4.1 Diskussion der Ergebnisse des ersten Experiments

4.1.1 Implikationen der Verhaltensdaten des ersten Experiments

Da die Antwortzeiten des ersten Experiments in der Bedingung des semantischen Urteilens länger waren als in der moralischen (durchschnittlich 2084 ms bei moralischem Urteilen, 2310 ms beim semantischen), und die Bedingung des semantischen Urteilens von den Probanden als schwieriger eingeschätzt wurde, ist es unwahrscheinlich, dass die höhere BOLD-Antwort in der moralischen Bedingung durch einen Unterschied in der Aufgabenschwierigkeit erklärt werden könnte. Die Antwortzeiten zeigen weiterhin, dass die Szenarien nicht-dilemmatischen Charakter besaßen, wie im Vergleich mit den Antwortzeiten auf die Dilemmata in der Studie von Greene et al. deutlich wird. Dort lagen die Antwortzeiten zwischen 4600 und 6800 ms.

4.1.2 Die Untersuchung einfacher nicht-dilemmatischer moralischer Entscheidungsfindung unter Ausschluss von direkter körperlicher Gewalt im Vergleich mit vorausgegangenen fMRT-Studien zur Neurokognition der Moral.

Von besonderem Interesse war der Vergleich der Ergebnisse des ersten Experiments mit den Experimenten, in denen für den Faktor Emotion kontrolliert wurde. Die Minimierung des Faktors „Emotion“ in diesen Kontrasten entspricht dem Ansatz des ersten Experiments, durch Ausschluss von direkter körperlicher Gewalt den Faktor Emotion gering zu halten. Da vorausgegangene Studien jedoch nicht zu einem einheitlichen Ergebnis hinsichtlich der Kontrolle der Emotionalität gekommen sind, ist eine Zuordnung der Ergebnisse des ersten Experiments zu Regionen, die von Emotionalität abhängig sind und solchen, die davon unabhängig sind, nicht möglich.

Alle im ersten Experiment aktivierten Regionen zeigten sich mit Ausnahme des Cuneus auch schon in anderen Studien zur Neurokognition der Moral aktiv. Die konsistentesten Übereinstimmungen in den Ergebnissen vorausgegangener Studien und dem ersten Experiment dieser Arbeit fanden sich im medialen und ventromedialen Präfrontalkortex, im posterioren Sulcus temporalis superior sowie im temporalen Pol. Diese Regionen fanden sich in der Mehrzahl der vorausgegangenen Studien während der Verarbeitung der moralischen Bedingung relativ zu der jeweiligen Kontrollbedingung aktiviert. Ihre Einordnung in den Kontext anderer

Kognitions-Studien sowie die Diskussion um ihre jeweilige Rolle im moralischen Urteil erfolgt im Abschnitt 4.4.

Zusammenfassend lässt sich also bemerken, dass die Ergebnisse des ersten Experiments die Annahme eines Netzwerks der Moralverarbeitung, welches den medialen und ventromedialen Präfrontallappen, den Temporalpol, und den posterioren Sulcus temporalis superior umfasst, unterstützen. Im Bereich des posterioren Gyrus cinguli (zu den anatomischen Begriffen „posteriorer Gyrus cinguli, Präcuneus und retrosplenalen Kortex“ siehe Kap. 4.4.1) fand sich keine Aktivierung im ersten Experiment, während diese Region in anderen Studien aktiv war (Greene et al., 2001; Moll et al., 2001). Es gelingt nicht, die Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Arbeiten und die Abweichungen der Ergebnisse des ersten Experiments, auf bestimmte Abweichungen im Versuchsdesign zurückzuführen, wie etwa der Kontrolle des Faktors Emotion.

4.2 Diskussion der Ergebnisse des zweiten Experiments

4.2.1 Implikationen der Verhaltensdaten des zweiten Experiments

Im zweiten Experiment waren die durchschnittlichen Antwortzeiten deutlich kürzer (zwischen 1907 ms in der Bedingung „Moralisches Urteilen mit Gewalt“ und 2277 ms in Bedingung „Moralisches Urteilen ohne Gewalt“) als in der Studie von Greene et al., was den eindeutigen, nicht-dilemmatischen Charakter der Szenarien belegt. Interessanterweise antworteten die Probanden schneller in den Gewalt enthaltenden Bedingungen. Der Schwierigkeitsgrad wurde zwischen den Bedingungen indes nicht unterschiedlich eingeschätzt. Insofern sind die höheren BOLD-Signale in dem Vergleich der „Szenarien ohne Gewalt“ mit den „Szenarien mit Gewalt“ wahrscheinlich nicht durch Unterschiede des Schwierigkeitsgrades zwischen den Bedingungen zu erklären. Eher ist ein Verarbeitungsvorteil für bedrohliche Stimuli zu diskutieren (siehe hierzu Kapitel 4.2.3). Dem entsprechen Studien, welche eine schnellere Verarbeitung bedrohlichen Wörtern gegenüber neutralen Wörtern (Dijksterhuis und Aarts, 2003), ebenso wie von bedrohlichen Gesichtern gegenüber freundlichen Gesichtern belegen (Ohman et al., 2001).

Die Einschätzungen von Emotionalität und Unmoral waren höher in den Gewaltszenarien, so dass der beabsichtigte psychologische Effekt der Gewaltszenarien durch die Verhaltensdaten bestätigt wurde.

4.2.2 Die Untersuchung einfacher nicht-dilemmatischer moralischer Entscheidungsfindung unter Präsentation von direkter körperlicher Gewalt im Vergleich mit vorausgegangenen fMRT-Studien zur Neurokognition der Moral

Alle Regionen, die im zweiten Experiment einen vermehrten BOLD-Signalanstieg in der moralischen Bedingung zeigten, waren auch in vorausgegangenen Studien anderer Arbeitsgruppen aktiv. Die Übereinstimmung der Aktivierungen des medialen und ventromedialen Präfrontallappens, des anterioren Temporallappens / Temporalpols, und des posterioren Sulcus temporalis superior zeigte sich ebenso wie im ersten Experiment auch im zweiten Experiment. Zusätzlich fand sich im zweiten Experiment die Aktivierung im Bereich des posterioren Gyrus cinguli. Diese Region fand sich auch in der Arbeit von Greene et al.: Bemerkenswerterweise beschränkte sich die Aktivierung jedoch nicht nur auf die „persönlichen moralischen Dilemmata“, sondern zeigte sich auch bei den „unpersönlichen moralischen Dilemmata“ im Vergleich zu den „nicht-moralischen Dilemmata“ aktiviert (Greene et al., 2001). Auch bei Moll et al. war diese Region sowohl vor, als auch nach Kontrolle für den Faktor Emotion aktiv (Moll et al., 2001). Dies deutet daraufhin, dass diese Aktivierung nicht auf den dilemmatischen Charakter der Szenarien zurückzuführen ist, und durch andere Faktoren, als den direkten Einfluss der Emotionalität der Stimuli zu erklären ist. Fraglich bleibt dann allerdings, in welchem Aspekt des Versuchsdesigns sich die moralischen Urteile, welche mit einer Aktivierung des posterioren Gyrus cinguli einhergehen, von jenen unterscheiden, welche dort keine Aktivierung zeigen. Wie noch im folgenden Kapitel gezeigt wird, sind die Ergebnisse der bildgebenden Studien über Emotionen von einer recht hohen Variabilität gekennzeichnet und bieten diesbezüglich keine ausreichenden Interpretationsansätze.

Es scheint nicht möglich, die Unterschiede der Ergebnisse bisheriger Studien zur Neurokognition der Moral, auf bestimmbare Unterschiede im Versuchsdesign, wie den Faktor „Emotion“, zurückzuführen. Es zeigte sich jedoch in den meisten, wenn auch nicht allen, bisherigen Studien eine Übereinstimmung der Aktivierungen in folgenden Arealen: im medialen Frontallappen (inklusive des ventromedialen Anteils), im Sulcus temporalis superior, im anterioren Temporallappen und posterioren Gyrus cinguli/Präcuneus. Diese Regionen können somit als die wichtigsten neuronalen Korrelate moralischer Entscheidungsprozesse angesehen werden.

4.2.3 Der Einfluss direkter körperlicher Gewalt

Ein wesentlicher Aspekt des zweiten Experiments der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses des Faktors „direkte körperliche Gewalt“ innerhalb der Szenarien, welche moralisch oder semantisch zu beurteilen waren. Dieser Faktor wurde in vorausgegangenen Studien nicht kontrolliert. Es zeigte sich im Vergleich der „Szenarien mit Gewalt“ gegenüber den „Szenarien ohne Gewalt“ keine signifikant höhere BOLD-Antwort. Das Ergebnis des Vergleichs der „Szenarien ohne Gewalt“ mit den „Szenarien mit Gewalt“ dagegen zeigt eine stärkere BOLD-Antwort während der gewaltlosen Szenarien beidseitig im temporalen Pol. Eine Region-of-interest-Analyse zeigte zudem bei einem niedrig angesetzten Schwellenwert ($Z > 1,7$; entsprechend eines $p < 0,05$ unkorrigiert) eine BOLD-Erniedrigung in der linken Amygdala während der Szenarien mit Gewalt.

Die vorausgegangenen Studien zur Neurokognition der Moral haben, wie in der Einleitung beschrieben, auf verschiedene Art versucht, den Faktor Emotion zu kontrollieren. Interessanterweise fanden sich vor Kontrolle Emotionalität stets mehr Lokalisationen aktiviert als nach der Kontrolle. Die Kontrolle der Emotionalität führte aber nicht zum konsistenten Wegfall bestimmter aktiver Areale. In zwei der vier vorausgegangenen Studien entfiel nach Kontrolle für den Faktor Emotion die Aktivierung im posterioren Sulcus temporalis superior (Greene et al., 2001; Moll et al., 2001), in den anderen beiden Studien zeigte der anteriore Temporallappen nach Kontrolle für den Faktor Emotion keine Aktivität mehr (Moll et al., 2002a; Moll et al., 2002b). Bei der Studie von Moll et al. mit visuellen Szenen als Stimuli waren nach Kontrolle der unangenehmen Emotionen zudem die Aktivierungen in der Amygdala und im posterioren Gyrus cinguli / Präcuneus weggefallen. Letzteres entsprach der Annahme über die emotionsverarbeitende Funktion dieser Areale. Entsprechende Hypothesen wurden über die Ergebnisse des Vergleichs der „Szenarien mit Gewalt“ mit den „Szenarien ohne Gewalt“ im zweiten Experiment der vorliegenden Arbeit gestellt. So wurde durch die Szenarien mit Gewalt eine Aktivierung der Amygdala und des posterioren Gyrus cinguli vermutet, was sich nicht bestätigen ließ.

Einen möglichen Ansatz zur Erklärung des geringeren BOLD-Signals während der Gewaltszenarien bieten Verhaltensdaten aus der vorliegenden und anderen Studien. Untersuchungen über die Verarbeitung von bedrohlichen Stimuli (Dijksterhuis und Aarts, 2003; Ohman et al., 2001) zeigten eine schnellere Verarbeitung von bedrohlichen Stimuli. Die Antwortzeiten während der Gewaltszenarien in der vorliegenden Studie replizierten dies. Eine

beschleunigte Verarbeitung könnte mit einer weniger intensiven neuronalen Verarbeitung einhergehen, die sich als geringeres BOLD-Signal während der Gewaltszenarien widerspiegelte. Die BOLD-Antwort der temporalen Pole zeigte jedoch keine signifikante Abhängigkeit von der Reaktionszeit. Lediglich das BOLD-Signal in der Region des dorsolateralen präfrontalen Kortex im Gyrus frontalis inferior korrelierte mit der Reaktionszeit der Probanden. Es lässt sich jedoch auch unabhängig von der Reaktionszeit eine weniger intensive neuronale Verarbeitung bedrohlicher Stimuli diskutieren, die zu einer dementsprechend geringeren Blutzufuhr, und somit zu einer BOLD-Erniedrigung führt.

Ausgegangen sind die Hypothesen über eine Aktivierung der Amygdala und des posterioren Gyrus cinguli von Studienergebnissen, welche sowohl der Amygdala, als auch dem posterioren Gyrus cinguli eine Funktion im Bereich der emotionalen Verarbeitung zuschrieben. Insbesondere die Funktion der Amygdala wird oft sehr spezifisch im Zusammenhang mit der Verarbeitung bedrohlicher Stimuli und negativer Emotionen, wie Angst, gesehen. Insgesamt scheint die Mehrheit der Studien den beiden Regionen eine entsprechende Funktion zuzuschreiben (hierzu seien folgende Studien: (Hamann und Mao, 2002; Isenberg et al., 1999; Strange et al., 2000; Tabert et al., 2001) und Reviews: (Adolphs, 2003; Buchel und Dolan, 2000; Davidson, 2002; Sander et al., 2003; Zald, 2003) zitiert). Über die funktionelle Neuroanatomie der Emotionen herrscht jedoch keineswegs Klarheit und Abweichungen der Ergebnisse von den diesbezüglichen Hypothesen sind in der funktionellen Bildgebung nicht selten. Beispiele hierfür geben folgende Studien, die herkömmliche Hypothesen über die funktionellen Neuroanatomie der Emotionen in Frage stellen. So zeigte sich keinerlei limbische Aktivität bei visueller Präsentation emotionaler Stimuli (Geday et al., 2003), eine Deaktivierung frontal und im posterioren Gyrus cinguli sowohl während traurigen und lustigen Filmen (Aalto et al., 2002), kein BOLD-Signal-Unterschied zwischen Ekel, Angst, Glücklichkeit, Traurigkeit (Winston et al., 2003). Die Amygdala zeigte in anderen Studien Aktivität auch bei positiven Emotionen (Garavan et al., 2001; Hamann und Mao, 2002; Hamann et al., 2002; Iwase et al., 2002; O'Doherty et al., 2001b; Yang et al., 2002), ebenso wie bei allgemein arousal- oder relevanzbezogenen Stimuli (Sander et al., 2003; Taylor et al., 2000).

Andere Studien berichten, dass verschiedene Emotionen in den gleichen makroskopischen Arealen Aktivität zeigen. Es ist möglich, dass der Unterschied auf dem mikroskopischen, interneuralen Zusammenspiels innerhalb derselben Regionen beruht, wie z.B. Pelletier et al. und Stark et al. (Pelletier et al., 2003; Stark et al., 2003) dies vorschlagen.

Bei den Ergebnissen funktionell-bildgebender Studien ist eine hohe Variabilität der makroskopischen funktionellen Anatomie der Emotionen festzustellen. Diese zeigt sich in recht

unterschiedlichen Ergebnissen von Studien, teilweise mit dem *selben* Versuchsdesign (Eugene et al., 2003), und anhand von Metaanalysen (Murphy et al., 2003; Phan et al., 2002; Phan et al., 2003b). So fordert Eugene eine Darstellung der Ergebnisse individueller Probanden, um über die Variabilität und Generalisierbarkeit der Ergebnisse Aussagen treffen zu können (Eugene et al., 2003). Es stellt sich die Frage, ob die übliche Probandenanzahl in den Emotionsstudien erhöht werden sollte, da die statistische Aussagekraft in Gruppenanalysen positiv von der Probandenanzahl und negativ von der intersubjektiven Variabilität abhängt, und letztere bei der BOLD-Antwort auf Emotionen höher sein könnte, als zunächst angenommen. Als mögliche Ursache der Variabilität können in diesem Zusammenhang unter anderem Persönlichkeitsfaktoren (Canli et al., 2001; Sugiura et al., 2000), anatomische (Brett et al., 2002) und genetische Faktoren diskutiert werden (Hariri et al., 2002; Miller, 2002).

Unabhängig von der Frage nach der Lokalisation von BOLD-Signalunterschieden zwischen den Gewaltszenarien und Szenarien ohne Gewalt ist das insgesamt spärliche Auftreten von lokalisierten BOLD-Signalunterschieden angesichts folgender Punkte weiter zu diskutieren:

Die Aufgaben, die der Proband befolgen musste (Moralisches und Semantisches Urteilen), beinhalteten keine bewusste Aufmerksamkeitslenkung auf die Emotionalität. Hierdurch entsteht eventuell schon ein schwächerer Effekt, als bei Studiendesigns, welche die bewusste Aufmerksamkeit der Probanden auf ihre Emotionalität richten ließen. Es kann vielmehr von einer Unterdrückung der emotionalen Prozesse durch eine nicht-emotionale kognitive Beanspruchung (besonders während des semantischen Urteilens) ausgegangen werden. Entsprechendes wurde in funktionell-bildgebenden Studien gezeigt (Hariri et al., 2000; Liberzon et al., 2000; Mayberg et al., 1999; Ochsner et al., 2002; Pochon et al., 2002; Tabert et al., 2001; Taylor et al., 2003).

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Erklärung des ausgebliebenen BOLD-Effektes durch die Gewaltszenarien wäre die Frage, ob Habituation eine Rolle gespielt hat. Die BOLD-Antwort auf emotionale und soziale Stimuli ist schon nach wenigen Stimuli von Habituation abhängig (Breiter et al., 1996; Feinstein et al., 2002; Phan et al., 2003a; Sugiura et al., 2001; Wright et al., 2001), und so könnte auch im vorliegenden Experiment mit 60 Gewaltszenarien Habituation eine Rolle gespielt haben. Andererseits sollte der Aufbau des Versuchs als ereigniskorreliertes Design diesem entgegenwirken. Ein möglicher Nachteil des ereigniskorrelierten Designs in diesem Zusammenhang könnte jedoch darin liegen, dass bei kurzen Pausenzeiten die emotionalen Reaktionen länger als die Pausen anhalten, so dass sie auch während der Szenarien ohne Gewalt die BOLD-Antwort beeinflussen würden, was sich im Kontrast der beiden Arten von Szenarien als Reduktion des Unterschiedes darstellen würde (Garrett und Maddock, 2001).

Weiterhin von Interesse war die Interaktion der beiden Faktoren Moral und Gewalt, und ob einige Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, wie auch vorausgegangener Versuche eventuell durch diese Interaktion erklärt werden könnten. Es zeigte sich jedoch bei einer entsprechenden Analyse keine Interaktion zwischen den beiden Faktoren.

4.3 Vergleich der Ergebnisse der beiden Experimente der vorliegenden Arbeit miteinander

Im Vergleich des moralischen Urteilens mit dem semantischen Urteilen sollten sich aufgrund Versuchsdesign und Auswertung die Ergebnisse beider Versuche weitgehend entsprechen. Das Vorliegen des zusätzlichen Faktors „Gewalt“ im zweiten Experiment sollte keinen Einfluss auf den Vergleich „Moralisches Urteilen“ gegenüber „Semantisches Urteilen“ haben, da beide Faktoren als einzelne Regressoren in das Allgemeine Lineare Modell eingingen, und sich keine Interaktion zwischen den Faktoren feststellen ließ.

Die Ergebnisse des zweiten Experiments replizierten die Ergebnisse des ersten weitgehend. Eine Aktivierung der Areale im medialen und ventromedialen Präfrontalkortex, im posterioren Sulcus temporalis superior sowie im Temporalpol ließ sich in beiden Experimenten feststellen. Im ersten Experiment zeigten sich darüber hinaus der Cuneus sowie der Gyrus frontalis medialis (im lateralen Präfrontalkortex) und im zweiten der posteriore Gyrus cinguli aktiv. Weiterhin gemeinsam ist beiden Experimenten der BOLD-Signalanstieg in der Bedingung „semantisches Urteilen“ gegenüber der Bedingung „Moralisches Urteilen“ im linken dorsolateralen Präfrontalkortex (BA46).

Im ersten Experiment zeigte sich in diesem Vergleich zusätzlich ein höheres BOLD-Signal im rechten dorsolateralen (BA46) und präzentralen Gyrus (BA6) sowie linksseitig im Nucleus Caudatus.

Im zweiten Experiment zeigten sich neben der dorsolateralen BOLD-Signal-Erhöhung aktivere Areale im Bereich des linken Gyrus supramarginalis (BA 40) und der linken Insula (BA 13).

Die beiden Versuchsdesigns unterschieden sich vor allem in der Präsentationsabfolge (Blockdesign / ereigniskorreliertes Design) und der Anzahl der Stimuli sowie in der Anwesenheit von Szenarien mit Gewalt im zweiten Experiment. Letzteres könnte im Hinblick auf die vermutete emotionsverarbeitende Funktion des posterioren Gyrus cinguli (Maddock und Buonocore, 1997) mit der dortigen Aktivierung im zweiten Experiment in Verbindung stehen. Allerdings spricht das Ausbleiben eines BOLD-Anstiegs im posterioren Gyrus cinguli im

Vergleich „Szenarien mit Gewalt“ gegenüber „Szenarien ohne Gewalt“ gegen diese Erklärung. Außerdem spricht die Trennung und die nicht-festgestellte Interaktion der Faktoren „Moralisches Urteilen / Semantisches Urteilen“ und „Gewaltpräsentation / keine Gewaltpräsentation“ in der Berechnung des Allgemeinen Linearen Modells gegen die Erklärung, da sich somit der emotionsauslösende Inhalt der gewaltbeinhaltenden Sätze nur in dem Kontrast „Gewaltpräsentation / keine Gewaltpräsentation“ darstellen sollte.

Letztlich bleiben die Ursachen für die Abweichungen der Ergebnisse beider Experimente fraglich. Die Übereinstimmungen hingegen replizieren, wie in Kapitel 4.1 und 4.2 gezeigt wurde, weitgehend bisherige Ergebnisse aus fMRT-Studien zum moralischen Urteilen, und unterstützen aktuelle Modelle der neuronalen Verarbeitung von Moral (Greene und Haidt, 2002; Moll et al., 2003; Moll et al., 2005).

4.4 Die Rolle der aktivierten Gehirnregionen für die moralische Kognition.

4.4.1 Die in Studien zur Neurokognition der Moral konsistent aktivierten Regionen

In diesem Abschnitt sollen die Regionen, die sich sowohl in den Experimenten der vorliegenden Arbeit als auch schon in vorausgegangenen Arbeiten aktiv zeigten, genauer in ihrer Funktion beschrieben werden: der mediale und ventromediale Präfrontalkortex, der laterale Gyrus frontalis medialis, der posteriore Sulcus Temporalis Superior, der Temporalpol und der Gyrus Temporalis Medialis sowie der posteriore Gyrus cinguli. Es sind dies alle in der vorliegenden Arbeit aktivierten Regionen außer dem Cuneus, welcher im hierauf folgenden Abschnitt 4.4.2 beschrieben wird. Dabei werden die Ergebnisse von Studien zur Neurokognition der Moral mit Studien über die neurobiologischen Grundlagen der sozialen Kognition und Emotion, vor allem funktionell-bildgebenden Studien und Läsionsstudien, in Kontext gesetzt.

Der mediale Frontallappen (BA 9/10/11)

In funktionell-bildgebenden Studien mit direktem moralischem Bezug spielte der mediale Frontallappen oft eine wichtige Rolle. Er zeigte sich außer im ersten und zweiten Experiment dieser Arbeit auch in folgenden Studien aktiv: (Greene et al., 2001; Moll et al., 2001; Moll et al., 2002b). Dabei fällt auf, dass die Region durch eine Kontrolle der Emotionalität in jeder dieser Studien unbeeinflusst blieb. Wie im Kontext von Emotionsstudien (s.u.) deutlich wird, ist dem

medialen Präfrontallappen jedoch eine Beteiligung an emotionalen Vorgängen nicht abzusprechen.

Es wurde der Region eine Beteiligung an folgenden Funktionen zugeschrieben: „*Theory-of-Mind*“ (Die Vorstellung des mentalen Zustands anderer Subjekte) (Castelli et al., 2000; Fletcher et al., 1995b; Gallagher et al., 2000; Goel et al., 1995) und *emotionale Verarbeitung externer Informationen*, wie angenehmer Bilder (Lane et al., 1999) und Wörter (Maddock et al., 2003). Patienten mit antisozialer Persönlichkeitsstörung zeigen hier eine reduzierte Aktivität bei der Verarbeitung emotionaler Bilder (Muller et al., 2003a) - dies könnte mit der Beeinträchtigung der moralischen Motivation und Handlungsplanung bei diesen Patienten in Zusammenhang stehen. Weitere Funktionen sind die *emotionale Verarbeitung interner Informationen*, wie der Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eigene Emotionen (Lane et al., 1997a), Erinnerung emotionaler Inhalte des autobiographischen Gedächtnisses (Reiman et al., 1997) und Planung in emotionalen Situationen (Partiot et al., 1995). Weiterhin wurde dem medialen Präfrontallappen eine Mitbeteiligung an *Urteilen über Präferenzen* (Paulus und Frank, 2003) zugeschrieben, an *selbstreflektiven Urteilen* (Johnson et al., 2002) sowie an einer die ferne Zukunft mehr als die nähere Zukunft betreffende *Handlungsplanung* (Ruby et al., 2002) und an *Belohnungsprozessen* (O'Doherty et al., 2001a). Es zeigt sich also eine Beteiligung des medialen Präfrontallappens an verschiedenartigen Funktionen, deren neuronale Teilprozesse auch beim moralischen Urteil eine Rolle spielen könnten. Unterstrichen wird die Rolle beim moralischen Urteil durch die Folgen der Läsionen des medialen Präfrontallappens: diese führen zu Beeinträchtigungen im praktischen Urteilen (Damasio, 1994; Damasio et al., 1994), reaktiven Aggressionen (Blair, 2001) und bei im Kindesalter erworbenen Läsionen zu einem verminderten Empathievermögen und einem verminderten Wissen um soziale Regeln (Anderson et al., 1999).

Der ventromediale / orbitofrontale Kortex (BA10/11)

Die Bezeichnungen ventromedialer, bzw. orbitofrontaler Kortex werden in der Literatur in vielen Fällen synonym benutzt, teilweise als verschiedene Regionen abgegrenzt. Soweit die Begriffe voneinander abgegrenzt werden, bezeichnet der ventromediale Teil eher den medialen ventralen Präfrontalkortex, während der orbitofrontale Teil eher den lateralen ventralen Präfrontalkortex bezeichnet. Für eine solche Unterteilung spricht, dass sich laterale und mediale Regionen des ventralen Präfrontalkortex in ihrer Funktion unterscheiden können (Elliott et al., 2000). Aufgrund der nicht einheitlich definierten Trennung der Begriffe überschneiden sich die in den zitierten Studien genannten Regionen jedoch teilweise.

Der ventromediale / orbitofrontale Kortex zeigte sich, außer in beiden Experimenten der vorliegenden Arbeit, in zwei weiteren Studien zum moralischen Urteil aktiv: (Moll et al., 2002a; Moll et al., 2002b). Dabei zeigten sich in beiden Studien die Aktivierungen von der Kontrolle der Emotionalität unbeeinflusst.

Dem ventromedialen Kortex wurden in verschiedenen Literaturbeiträgen folgende, eventuell mit dem moralischen Urteil in Zusammenhang stehende Funktionen zugeschrieben: *Handlungsplanung und -kontrolle* (Adolphs, 1999; Baxter et al., 2000; Fuster, 2002), neuronale Repräsentation „*Somatischer Marker*“, welche nach A. Damasio für die moralische Handlungsplanung von Bedeutung sein sollen (Bechara et al., 2003; Damasio, 1996). Als weitere Funktionen wurden beschrieben: *emotionale Verarbeitung* (Decety und Chaminade, 2003; Goel und Dolan, 2003; Lane et al., 1997b) sowie *Urteile über Präferenzen* (Paulus und Frank, 2003), ein Prozess, der die Einbeziehung emotionaler Prozesse in den Urteilsprozess erfordert sowie *deduktive Logik* nach logisch-emotionalem Training (Houde et al., 2001). Auch beim moralischen Urteilen wird deduktiv mit Hilfe von allgemeinen Regeln eine spezielle Situation beurteilt.

Dem orbitofrontalen Kortex wurden ähnliche Funktionen zugeschrieben: *emotionale Verarbeitung* (Adolphs, 2001; Adolphs, 2002; Blair et al., 1999; Maratos et al., 2001; Spinella, 2002) sowie *emotionsbezogenes Urteilen* (Farrow et al., 2001; Royet et al., 2000) und *emotionale Gedächtnisfunktionen* (Damasio et al., 2000) sowie *Verarbeitung sozial relevanter Information* (Allison et al., 2000), insbesondere Verletzungen der sozialen Norm (Berthoz et al., 2002a). Die Aktivierung der Region korreliert zur Stärke von Belohnungen und Bestrafungen (O'Doherty et al., 2001a) und spielt eine Rolle beim Erlernen und Verlernen von Verstärkungen sowie der Kontrolle von verstärkungsassoziiertem Verhalten (Rolls, 1996). Des Weiteren ist der orbitofrontale Kortex an *Entscheidungsfindungsaufgaben und Handlungsplanung* (Bechara et al., 2000; Rogers et al., 1999) beteiligt. Diskutiert wird auch eine Rolle in der Repräsentation von Erwartungen negativer Emotionen anderer Menschen, oder deren Anwendung in der Unterdrückung unsozialen Verhaltens (Blair und Cipolotti, 2000).

Hinsichtlich der neurobiologischen Grundlagen des moralischen Verhaltens sei hier besonders auf das orbitofrontale/ventromediale Funktionsdefizit hingewiesen, welches bei Psychopathen festzustellen ist (Blair et al., 2001; Lapierre et al., 1995; Mitchell et al., 2002; Veit et al., 2002) sowie auf die Folgen von Läsionen des ventromedialen bzw. orbitofrontalen Kortex. Diese wurden auch nach dem historischen Fall des Phineas Gage zahlreich beschrieben, hierauf wurde

jedoch schon in der Einleitung detailliert eingegangen (Kap 1.1.1.1). Es sei an dieser Stelle aber noch mal betont, dass die Folgen der Läsionen, wie auch der Psychopathie eher das verantwortungsvolle *Handeln* als das regelkonforme *Urteilen* betreffen. Bei im Erwachsenenalter erworbenen orbitofrontalen/ventromedialen Läsionen folgt keine Beeinträchtigung des moralischen Urteilens, wohl aber des moralischen Handelns (Bechara et al., 1994; Eslinger und Damasio, 1985). Bei in der Kindheit erworbenen Läsionen ist jedoch auch das moralische Urteilen betroffen. Dies macht eine Beteiligung dieser Region am *Erlernen* sozialer Regeln wahrscheinlich (Anderson et al., 1999). Funktionelle Studien, welche dieser Region Belohnungs- und Bestrafungsvorgänge zuschreiben, unterstützen diese Hypothese. Denkbar ist, dass die Integration von Emotionalität und Handlungsplanung hier vollzogen wird, deren Dysfunktion bei Patienten mit präfrontalen Läsionen und Psychopathen zu dissozialem Handeln führt.

Mögliche Funktionen des orbitofrontalen/ventromedialen Kortex im moralischen Kontext liegen somit in der Repräsentation von Belohnung und Bestrafung, der Kontrolle unangemessenen und unvorteilhaften Verhaltens, Entscheidungsfindung sowie in der Erkennung oder Erwartung von Emotionen anderer Menschen.

Der Gyrus cinguli posterior, Präcuneus und retrosplenale Kortex (BA31/7)

Auch die Definition und Abgrenzung dieser anatomischen Regionen, insbesondere des retrosplenalen Kortex, ist bei verschiedenen Autoren nicht einheitlich und Diskussionsgegenstand der Literatur (Maddock, 2000; Maddock, 1999; Vogt et al., 2000). Daher werden diese Regionen in diesem Abschnitt gemeinsam besprochen. Eine Aktivierung zeigte sich nur im zweiten Experiment der vorliegenden Arbeit in dieser Region. Bei folgenden Studien zeigten sich ebenfalls Aktivierungen: (Greene et al., 2001; Moll et al., 2001) (beide unbeeinflusst durch die Kontrolle der Emotionalität) und (Moll et al., 2002b) (bei letzterer nur, wenn nicht für den Faktor Emotionalität kontrolliert wurde).

Dem Gyrus cinguli posterior wurden *Gedächtnisfunktionen* zugeschrieben, insbesondere mit emotionalen und persönlichen, autobiographischen Inhalten oder Zusammenhängen (Damasio et al., 2000; Fink et al., 1996; Fletcher et al., 1995a; Maddock, 1999; Maratos et al., 2001; Shah et al., 2001; Shallice et al., 1994; Zysset et al., 2002). Es zeigte sich interessanterweise eine geringere Aktivierung bei Patienten mit antisozialer Persönlichkeitsstörung während der Bearbeitung einer Aufgabe zum affektiven Gedächtnis (Kiehl et al., 2001). Der Abruf autobiographischer, emotionaler Gedächtnisinhalte könnte beim Vergleich der moralisch zu

beurteilenden Handlung mit persönlichen Erfahrungen bedeutsam sein. Weiterhin spielt die Region eine Rolle bei der *Verarbeitung von emotional bedeutsamen Wörtern* (Maddock et al., 2003; Maddock und Buonocore, 1997), bei der *Handlungsplanung* (Lazeron et al., 2000; Ruby et al., 2002), beim *selbstreflektiven Urteilen* (Johnson et al., 2002) sowie beim *Urteilen über Vergebbarkeit krimineller Handlungen* und über *empathische Urteile* (Farrow et al., 2001). Weiterhin wird eine Beteiligung an von explizitem Wissen abhängigen *Entscheidungsvorgängen* (Ernst et al., 2002) sowie an der Bildung einer *Theory-of-Mind* (Fletcher et al., 1995b; Gallagher et al., 2000) beschrieben.

Mögliche beim moralischen Urteil bedeutsame Funktionen dieser Region könnten somit in der Verarbeitung der emotionalen Bedeutung von Wörtern sowie einer Handlungsplanung unter Einbeziehung autobiographischer Gedächtnisinhalte und Selbstreflektion bestehen. Auch das Funktionsdefizit bei Patienten mit antisozialer Persönlichkeitsstörung unterstreicht die Bedeutung der Region im Zusammenhang mit der Verarbeitung moralischer Regeln. Weiterhin interessant ist die Beteiligung an Urteilsfunktionen, sowohl über die eigene Person, als auch über die Handlungen anderer Personen (z.B. über die Vergebbarkeit krimineller Handlungen) sowie die Beteiligung an den Theory-of-mind-Funktionen, die dem moralischen Urteil nahe stehen.

Der posteriore Sulcus temporalis superior (BA 21/22/39)

Eine Aktivierung dieser Region zeigte sich beim Vergleich des moralischen Urteilens gegenüber dem semantischen Urteilen in beiden Experimenten dieser Arbeit. Bei vorausgehenden, moralbezogenen Studien war der posteriore Sulcus temporalis superior recht konsistent aktiv: (Greene et al., 2001; Moll et al., 2001) (beide nur vor der Kontrolle der Emotionalität) sowie (Moll et al., 2002a; Moll et al., 2002b) (beide unabhängig von der Kontrolle der Emotionalität).

Weiterhin zeigte sich in Studien eine Beteiligung an der *Verarbeitung sozial bedeutsamer Bewegungsmuster* (Allison et al., 2000; Beauchamp et al., 2002; Carr et al., 2003; Castelli et al., 2000; Kilts et al., 2003; Pelphrey et al., 2003b; Pelphrey et al., 2003a), und der Bildung einer *Theory-of-Mind* (Baron-Cohen et al., 1999; Castelli et al., 2000; Frith und Frith, 1999; Frith, 2001; Gallagher und Frith, 2003; Ruby und Decety, 2003). Des Weiteren werden hier *Gesichtsausdrücke verarbeitet* (Blair et al., 1999; Kesler-West et al., 2001; Narumoto et al., 2001; Shah et al., 2001; Wicker et al., 2003; Winston et al., 2002), eine Funktion, welche zur Abschätzung der Folgen einer sozialen Handlung wichtig ist, und beim Aufbau von sozialen Regeln eine wichtige Rolle spielen könnte. Zudem zeigte sich die Region beim Betrachten von emotionsauslösenden Filmen (Lane et al., 1997b; Reiman et al., 1997) aktiv. Ebenso scheinen

Gedächtnisfunktionen (Fink et al., 1996; Fletcher et al., 1995a) und *sprachliche Verarbeitung* (Fletcher et al., 1995b; Luke et al., 2002; Vandenberghe et al., 1996), was sich in den Signal-Zeitverläufen der vorliegenden Arbeit nicht widerspiegelt, (siehe Kap.3.1.2.2) sowie eine die fernere Zukunft betreffende Handlungsplanung (Ruby et al., 2002) im posterioren Sulcus temporalis superior bearbeitet zu werden.

Zusammenfassend stellt sich die sozialkognitive Bedeutung des Sulcus temporalis superior besonders deutlich dar. Sozial bedeutsame Bewegungsmuster vom Körper im Allgemeinen und von Gesicht und Augen im Speziellen werden hier verarbeitet. Die Einschätzung des emotionalen Gehalts von Gesichtsausdrücken sowie deren Imitation und Bildung einer Theory-of-Mind sind weitere Funktionen, welche die sozialkognitive Bedeutung dieser Region unterstreichen und zum moralischen Urteil beitragen könnten. Weitere kognitive Funktionen liegen in der semantischen Verarbeitung und Gedächtnisfunktionen.

Der temporale Pol (BA38)

Der temporale Pol war außer in beiden Experimenten dieser Arbeit auch in anderen Studien beim einfachen moralischen Urteilen aktiv. In einer Studie ließ sich keine Abhängigkeit von der Kontrolle der Emotionalität erkennen (Moll et al., 2001), in der anderen trat die Aktivierung nur vor der Kontrolle der Emotionalität auf (Moll et al., 2002a).

Dem Temporalpol bzw. anterioren Temporallappen wurden folgende Funktionen zugeschrieben, deren eventuelle Bedeutung für das moralischen Urteil größtenteils schon in obigen Abschnitten erläutert wurde: *Gedächtnisfunktionen*, insbesondere autobiographische (Fink et al., 1996; Reiman et al., 1997) und emotionsbezogene (Dolan et al., 2000), Bildung einer *Theory-of-Mind* (Castelli et al., 2000; Frith, 2001; Gallagher und Frith, 2003; Ruby und Decety, 2003). Des Weiteren ist die Region beteiligt an der *emotionalen Verarbeitung meist visueller Stimuli* (Beauregard et al., 2001; Dolan et al., 2000; Lane et al., 1997a; Lane et al., 1997b; Lane et al., 1999; Reiman et al., 1997; Reiman, 1997; Royet et al., 2000), der *Handlungsplanung in emotionalen Situationen* (Partiot et al., 1995) sowie der Verarbeitung von Gesichtern und deren Ausdrücken (Blair et al., 1999; Nakamura et al., 2000). Weiterhin scheinen *sprachliche Verarbeitung* (Fletcher et al., 1995b) und *semantische Entscheidungen* (Noppeney und Price, 2002a; Noppeney und Price, 2002b) die Region zu aktivieren. Auch in den Signal-Zeitverläufen in der semantischen Bedingung des ersten Experiments zeigt sich ein leichter Anstieg des BOLD-Signals, während im zweiten Experiment ein Abfall des Signals zu verzeichnen ist.

Läsionen dieser Region führen zur Beeinträchtigung des Gedächtnisses (Grabowski et al., 2003; Tanaka et al., 1999), wie auch Störungen der Affektivität (Murai und Fujimoto, 2003). Die Symptomatik der fronto-temporalen Demenz mit kognitiven, emotionalen, empathischen und sozialen Defiziten ist neben dem ventromedialen Defizit (Salmon et al., 2003) mitunter auf die Schädigung des anterioren Temporallappens zurückführbar (Perry et al., 2001).

Mögliche, der Moral nahestehende Funktionen des temporalen Pols liegen somit in der emotionalen Färbung von Erfahrungen und Erinnerungen, Verarbeitung von Gesichtern und deren Ausdrücken, Handlungsplanung sowie Beteiligung an der Bildung einer Theory-of-Mind. Die Aktivierung der temporalen Pole während des moralischen Urteilens lässt sich gut mit diesen Funktionen vereinbaren. Die verminderte BOLD-Antwort während der Präsentation von Gewalt scheint den postulierten emotionalen Verarbeitungen in dieser Region eher zu widersprechen. Dieser Punkt wurde im Abschnitt 4.2.3 diskutiert.

Der Gyrus temporalis medialis (BA 21)

Der temporale Pol wurde im vorigen Abschnitt besprochen. Die Aktivierungen im temporalen Pol erstrecken sich teilweise nach posterior vor allem im Bereich des Gyrus temporalis medialis oder es zeigen sich dort vom temporalen Pol abgetrennte Aktivierungen, wie etwa im ersten Experiment der vorliegenden Arbeit. Daher soll diese Region hier gesondert besprochen werden. In Neuroimaging-Studien mit direktem moralischem Bezug zeigte sich der Gyrus temporalis medialis unabhängig von der Kontrolle der Emotionalität in einer Studie aktiv (Moll et al., 2002b).

Dem Gyrus temporalis medialis wurden folgende (kognitive) Funktionen zugeschrieben: *Verarbeitung von Gesichtsausdrücken* (Critchley et al., 2000; Kilts et al., 2003), *Verarbeitung nicht-lebender Dinge* (Beauchamp et al., 2002; Mummery et al., 1998), empathische Urteile (Farrow et al., 2001), *semantische Verarbeitung* (Muller et al., 2003b; Vandenberghe et al., 1996) sowie *Handlungsplanung* über längere Zeiträume (Ruby et al., 2002).

Die für das moralische Urteil bedeutsamen Funktionen des Gyrus temporalis medialis lassen sich in der Verarbeitung emotionaler Signale anderer Menschen sehen, was durch die Mitbeteiligung am empathischen Urteil noch unterstrichen wird. Interessant ist aber die widersprüchlich erscheinende Tatsache, dass in dieser Region visuell oder sprachlich dargebotene nicht-lebende Objekte, wie Werkzeuge eher verarbeitet werden als lebendige, wie Menschen.

Der laterale Gyrus frontalis medialis (lateral Frontalpol), (BA 10/46/47)

Im ersten Experiment fand sich linksseitig eine Aktivierung des lateralen Gyrus frontalis medialis, welche auch in vorausgegangenen Studien (Moll et al., 2001; Moll et al., 2002b) gefunden wurde.

Wie sich in weiteren Studien zeigte, ist die Region bei *Gedächtnisfunktionen, insbesondere des Arbeitsgedächtnis* (Braver und Bongiolatti, 2002; Lee et al., 2002; Manoach et al., 2004; Nyberg et al., 2003; Ranganath et al., 2003; Zhang et al., 2003) aktiviert. Auch *semantische Verarbeitung* findet in hier statt (Dapretto und Bookheimer, 1999; Heim et al., 2003; McDermott et al., 2003; Noppeney und Price, 2002a; Pilgrim et al., 2002), wobei Wörter, welche etwas Lebendes bezeichnen, mehr als Wörter, die Nicht-Lebendes bezeichnen, zu einer Aktivierung der Region führen (Leube et al., 2001). Eine Erhöhung des BOLD-Signals während des semantischen Urteilens ließ sich auch im Signal-Zeitverlauf des ersten Experiments zeigen. Der entsprechende Anstieg während des moralischen Urteilens war jedoch deutlicher. Die beschriebene Beteiligung an semantischer Verarbeitung und Aufgaben des Arbeitsgedächtnisses suggerieren eine Beteiligung an eher rationalen Teilprozessen während des moralischen Urteilens. Es zeigten sich jedoch auch Aktivierungen in Studien zur *emotionalen Verarbeitung* (Berthoz et al., 2002a; Levesque et al., 2003a; Levesque et al., 2003b; Maddock et al., 2003), wobei diese teilweise eher durch positive Stimuli als durch negative bewirkt werden (Liberzon et al., 2003). Durch bilaterale Läsionen des Frontalpol ist die Erkennung des emotionalen Inhalts von Sprache anhand der Satzmelodie (Prosodie) gestört (Adolphs et al., 2002). Alexithyme Patienten weisen während positiver visueller Stimuli eine stärkere Aktivierung in der Region auf, als gesunde Probanden (Berthoz et al., 2002b). *Belohnung und Handlungsplanung* (Burgess et al., 2001; Pochon et al., 2002; Rogers et al., 1999) insbesondere eine die nahe Zukunft betreffende Handlungsplanung (Ruby et al., 2002) sind weitere dem lateralen Frontalpol zugeordnete Funktionen. Dementsprechend könnte diese Region beim moralischen Urteilen auch an der emotionalen Bewertung einer Handlung sowie deren Einfluss auf die Handlungsplanung beteiligt sein.

4.4.2 Eine weitere in der vorliegenden Arbeit, nicht aber in vorausgegangenen Studien, aktivierte Region

Als einzige Region, welche, sich nicht schon in vorherigen Studien zum moralischen Urteilen aktiv zeigte, ist der Cuneus zu nennen.

Der Cuneus (BA 17/18)

Der Cuneus zeigte sich im Zusammenhang mit Studien zur Neurokognition der Moral lediglich im ersten Experiment der vorliegenden Arbeit aktiv.

Der Cuneus spielt im Rahmen der visuellen Wahrnehmung eine wesentliche Rolle und es wurden ihm bisher nur selten Mitwirkung an sozialen und kognitiven Funktionen zugeschrieben. Für diese Arbeit von Interesse erscheint die Aktivierung während einer *Handlungsplanungsaufgabe* (Tower-of-London-Task) (Lazeron et al., 2000). Es zeigte sich ferner ein Hypometabolismus im Cuneus bei Patienten mit Borderline-Persönlichkeitsstörung (Juengling et al., 2003), was mit deren gestörter *Impulskontrolle* in Zusammenhang stehen könnte. Im Zusammenhang mit Emotionalität ist eine Aktivierung durch die affektive Komponente von Schmerz (Fulbright et al., 2001) zu nennen sowie die Verarbeitung dynamischer Ausdrücke glücklicher Gesichter (Kilts et al., 2003).

Eine Mitbeteiligung dieser Region an Planungsvorgängen, wie auch emotionaler Verarbeitung ist in der Literatur also nicht völlig unbekannt, es jedoch fällt es schwer, dem Cuneus in der Funktion des moralischen Urteilens eine spezifische Unterfunktion zuzuteilen.

4.5 Ziele und Grenzen der funktionellen Bildgebung kognitiver Funktionen und die Identifizierung eines die moralische Kognition repräsentierenden Netzwerks

Mit Hilfe der funktionellen Bildgebung lassen sich Regionen oder Netzwerke identifizieren, die an der Verarbeitung psychischer Funktionen beteiligt sind. Komplexe psychische Funktionen setzen sich aus elementaren psychologischen Prozessen zusammen. Auf das moralische Urteil bezogen, könnten gewissen Areale oder Netzwerke z.B. für eine Analyse der sozialen Situation und deren eventuelle Folgen auf den mentalen Zustand anderer Personen (Theory-of-Mind), andere Areale für eine emotionale Bewertung, weitere für deduktive Schlussfolgerungen aufgrund erlernter sozialer Regeln funktionell zuständig sein. Wenn durch experimentelle Studien bestimmte Regionen oder bestimmte Netzwerke solchen elementaren Prozessen zugeordnet werden könnten, und sich diese Areale oder Netzwerke auch beim moralischen Urteil aktiv zeigten, so ließen sich die philosophischen und psychologischen Konstrukte über die elementaren Prozesse des moralischen Urteils aufgrund der zugrundeliegenden neuronalen Aktivität als mehr oder weniger wahrscheinlich zutreffend bewerten. Dieses Ziel liegt jedoch zu diesem Zeitpunkt noch in weiter Ferne, und es erscheint trotz der Vielfalt der Studien über höhere kognitive Funktionen und Emotionen bisher kaum eine Zuordnung von Region und abstrahierten elementaren sozial-kognitiven Funktionen möglich. So stehen Aktivierungen in einer bestimmten Region verschiedenste Versuchsdesigns gegenüber, unter denen ein gemeinsamer Nenner oft nicht zu finden ist. Teilweise bringen sehr ähnliche oder sogar das selbe Versuchsdesign unterschiedliche Ergebnisse zu Tage (Eugene et al., 2003). Es stellt sich die Frage, warum eine Zuordnung von Lokalisation und Funktion so häufig misslingt. Mögliche Gründe hierfür liegen teilweise in der fehlerhaften Annahme, dass in einer Region oder in einem makroskopischen Netzwerk auch nur *eine* elementare Funktion bearbeitet wird. Einer Region oder auch einem makroskopischen Netzwerk könnten recht verschiedene Funktionen zukommen. Die neurologische Grundlage dieser Funktionen unterscheidet sich dann nicht in der makroskopischen Lokalisation der BOLD-Antwort, sondern in dem neuronalen Zusammenspiel innerhalb dieser Region. Es ist möglich, dass einige neuronale Korrelate psychischer Funktionen sich eher in ihren zellulären Interaktionen unterscheiden, als in ihrer makroskopischen Organisation, und somit von der fMRT nicht erfasst werden. Weitere Gründe für Schwierigkeiten bei der Zuordnung von Regionen und Funktionen könnten in einem Nicht-Zutreffen der psychologischen Konstrukte, welche den Versuchsdesigns sowie der Ergebnisinterpretation zugrunde gelegt werden, unterschiedlichen Operationalisierungen der Begriffe, oder einer mangelnden Validierung des Stimulusmaterials liegen. Weiterhin ist es

möglich, dass manche psychische Funktionen einer höheren inter- und intraindividuellen funktionell-anatomischen Variabilität unterliegen als andere. Dies könnte im Hinblick auf die vielen Abweichungen der Ergebnisse von Emotionsstudien (Phan et al., 2002) für die neuronalen Korrelate von Emotionen sowie deren Verarbeitung, Interaktionen mit kognitiven Prozessen, etc. zutreffen. Die genannten Punkte sind bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit und bei dem Vergleich mit anderen sozial-kognitiven fMRT-Studien, wie im Kapitel 4.4 erfolgt, sowie bei der Identifizierung eines „moralischen Netzwerks“ zu beachten. Die Übereinstimmung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit den Ergebnissen der vorausgegangenen Studien zur Neurokognition der Moral lässt ein frontotemporales Netzwerk erkennen, welches makroskopisch das neuronale Korrelat des moralischen Urteilens darstellt. Die Postulierung dieses „moralischen Netzwerks“ wird durch die in den zitierten Studien festgestellten Funktionen der einzelnen Areale unterstützt: insbesondere die Bildung einer Theory-of-Mind sowie die Verarbeitung sozialer Reize, in Verbindung mit emotionaler Verarbeitung und Handlungsplanung sind Voraussetzungen für ein den sozialen Regeln entsprechendes Handeln. Es erscheint eine abgrenzende Definition der Funktionen der einzelnen in Kapitel 4.4 beschriebenen Gehirnregionen sowie deren Zuordnung zu Teilprozessen im moralischen Urteil jedoch zum jetzigen Stand der Forschung als verfrüht oder nicht möglich. Entsprechende Ansätze wurden von Moll et al. diskutiert und versucht, in ein zusammenfassendes Modell zu integrieren (Moll et al., 2005). Eine Auftrennung in Areale, welche dem „emotionalen“ Anteil und Areale, welche dem „rationalen“ Anteil des moralischen Urteils entsprächen, erscheint ebenso nicht möglich. In allen am moralischen Urteil beteiligten Arealen wurden sowohl „nicht-emotionale“, wie auch „emotionale“ Prozesse verarbeitet. Auch die emotionale Reaktion auf die in den Studien zur Neurokognition der Moral verwandten Stimuli ließ sich nicht bestimmten Regionen zuschreiben.

5. Zusammenfassung

Die funktionelle Bildgebung ist eine noch relativ junge Methode der Neurowissenschaften, welche einen erheblichen Fortschritt zum Verständnis der funktionellen Neuroanatomie bietet. Der großen Vielfalt kognitiver Funktionen steht eine ständig wachsende Anzahl von Veröffentlichungen gegenüber. Es fällt weiterhin schwer, einzelnen kognitiven Funktionen definierte anatomische Areale oder Netzwerke zuzuordnen. Auch die Verarbeitung moralischer Urteile wurde auf verschiedene Weisen untersucht. In diesen Studien wurden komplexe Dilemmata oder emotional stark ansprechende Szenarien verwandt. Dagegen wurde im ersten Experiment der vorliegenden Studie untersucht, welche Gehirnregionen aktiviert sind während moralischen Urteilens über eindeutige, nicht-dilemmatische Szenarien, welche keine direkte Körperverletzung enthielten. Im Vergleich zur Kontrollbedingung, dem semantischen Urteilen, zeigte sich ein fronto-temporales Netzwerk mit den Hauptaktivierungen im linken posterioren Sulcus temporalis superior, linken Gyrus temporalis medialis und beidseitig im temporalen Pol sowie im linken lateralen, im rechten medialen und beidseitig im ventromedialen Präfrontalkortex sowie im rechten Cuneus. Im zweiten Experiment der vorliegenden Studie wurde als zusätzlicher Faktor die direkte Körperverletzung in die zu beurteilenden Szenarien mit eingebracht. Beim Vergleich der Verarbeitung des moralischen Urteilens mit der Verarbeitung des semantischen Urteilens ließen sich Ergebnisse aus dem ersten Experiment größtenteils replizieren. So zeigten sich in beiden Experimenten Aktivierungen im medialen und ventromedialen Präfrontalkortex, im posterioren Sulcus temporalis superior und im temporalen Pol. Im zweiten Experiment fand sich zudem eine Aktivierung im posterioren Gyrus cinguli.

Die Ergebnisse vorausgegangener Studien zur Neurokognition der Moral und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen Übereinstimmungen, vor allem im medialen und ventromedialen Präfrontalkortex, im posterioren Sulcus temporalis superior, im Temporalpol und im posterioren Gyrus cinguli. Daneben zeigen sich aber auch Abweichungen, die möglicherweise auf das Versuchsdesign zurückzuführen sind, wobei unklar bleibt, welche Details im Versuchsdesign die jeweilige Abweichung verursacht haben könnte. Insbesondere eine Auftrennung in konsistent emotionsabhängige und emotionsunabhängige Regionen ließ sich weder durch den direkten Vergleich der Versuchsdesigns der Studien zum moralischen Urteil, noch durch Hinzuziehen anderer Emotions- und Kognitionsstudien erkennen. Deutliche Übereinstimmungen zeigen die Ergebnisse von Studien zur Neurokognition der Moral mit Untersuchungen, welche folgende Funktionen betrafen: Theory-of-Mind, Emotionsverarbeitung, Gedächtnisfunktionen,

Handlungsplanung und Verarbeitung sozialer Reize, wie Gesichtsausdrücke und Bewegungsmuster.

Einen besonderen Ansatz in der vorliegenden Arbeit bot der Ausschluss, bzw. die Kontrolle von Gewaltpräsentation in den zu beurteilenden Szenarien. Bei der Verwendung von Stimuli, die keine direkte Körperverletzung enthalten, zeigte sich im ersten Experiment ein Netzwerk von Hirnregionen aktiv, welches den Ergebnissen vorausgegangener Studien weitgehend entsprach, obwohl in diesen nicht auf die Präsentation körperlicher Gewalt verzichtet wurde. Auch die gesonderte Auswertung des Faktors „Gewalt“ im zweiten Experiment ließ keine Zuordnung von bestimmten Regionen und der Verarbeitung von Gewalt zu. Die Präsentation von Gewalt führte zu einem geringeren BOLD-Signal im temporalen Pol, einer Region, die am moralischen Urteil recht konsistent beteiligt ist. Zudem zeigte sich bei diesen Szenarien in der Analyse der Antwortzeiten eine schnellere Antwort der Probanden. Beides weist auf einen Verarbeitungsvorteil und eine reduzierte Verarbeitungstiefe für bedrohliche Stimuli hin. Weiterhin wurde hinsichtlich des geringen Effekts des Faktors „Gewaltpräsentation“ u.a. die Annahme einer hohen interindividuellen Variabilität in der emotionalen Verarbeitung diskutiert, wie auch der Effekt einer Habituation sowie die Unterdrückung emotionaler Prozesse durch nicht-emotionale kognitive Beanspruchung, insbesondere während des semantischen Urteilens.

6. Ausblick

Mögliche Ansatzpunkte für eine weitere Forschungstätigkeit zur Neurokognition der Moral bestehen in einer Untersuchung elementarer kognitiver Prozesse während moralischen Urteilens, wie das Erfassen der dargestellten Handlung, das Erfassen der Konsequenzen für die Beteiligten, die emotionale Bewertung dieser Konsequenzen, die Abstraktion der Handlung, Abgleich mit erlernten sozialen Regeln. Neben dem moralischen Urteilen bietet die Untersuchung des moralischen Handelns Ansatzpunkte für eine weitere Forschungstätigkeit. Wie aus Studien über Frontalhirnläsionen und über Patienten mit antisozialer Persönlichkeitsstörung bekannt, bedingt eine intakte Fähigkeit zum moralischen Urteilen nicht notwendigerweise ein entsprechendes Handeln. Moralisch relevantes Handeln ist schwierig in die Untersuchungssituation eines fMRT-Experiments zu integrieren, aber eine soziale Interaktion mit Menschen außerhalb des MRT-Gerätes lässt sich herstellen und es können Situationen konstruiert werden, in denen der Proband in dieser Interaktion die Möglichkeit hat, sich mehr oder weniger moralisch zu verhalten.

Interessant wäre der Einfluss von moralischer Kompetenz und Entwicklungsstufen, allgemeiner Intelligenz, Persönlichkeitsfaktoren und Geschlecht auf die neurologischen Korrelate des moralischen Urteilens und Handelns, bzw. der dem Urteil und Handeln zugrunde liegenden elementaren Prozesse. Die Einbeziehung von Patienten mit antisozialer Persönlichkeitsstörung in diese Untersuchungen könnte wichtige Aspekte der neurobiologischen Grundlage dieser Erkrankung aufdecken.

Die eingehende Diskussion der Studien zum moralischen Urteil unter Berücksichtigung von Studien zur sozialen Kognition und Emotion hat gezeigt, dass die Neuroanatomie dieser psychischen Funktionen eine Komplexität aufweist, von deren zufrieden stellendem Verständnis wir noch weit entfernt sind. Eine „medizinische“ Anwendung der hier vorgelegten und in anderen Studien erbrachten Ergebnisse ist zu diesem Zeitpunkt nicht in Sicht, und sollte auch in Zukunft mit der notwendigen Skepsis hinterfragt werden. Neben den Risiken des Missbrauchs eines Erkenntnisfortschritts stehen auch die Chancen (philosophischer, psychologischer, medizinischer und gesellschaftlicher Art), die dieser offenbart. Um sich diesen in verantwortungsvoller Weise anzunähern, ist eine gründliche und selbstkritische Forschung zum Thema notwendig. Ein tiefes und detailliertes Wissen über die neurobiologischen Grundlagen der Moral verspricht einen verantwortungsvolleren Umgang mit dem Thema, als das Unwissen darüber bieten kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rekonstruktion der Folgen des Unfalls von Phineas Gage (Damasio et al., 1994)	3
Abbildung 2: Ergebnisse der Studie von Greene et al., 01..	7
Abbildung 3: Regionen mit einem stärkeren fMRT-Signal während Moralischem Urteilen gegenüber dem Urteilen über Fakten (Moll et al., 01)..	8
Abbildung 4: fMRT-Signal während moralischem Urteilen gegenüber dem Urteilen über Fakten nach Einführung der emotionalen Bewertung als Kovariate (Moll et al., 01).	8
Abbildung 5: fMRT-Signal während Moralischem Urteilen gegenüber moralisch-neutralem Urteilen (Moll et al., 02a)..	9
Abbildung 6: fMRT-Signal beim Vergleich der moralischen mit der neutralen Bedingung (Moll et al., 02b)..	10
Abbildung 7: fMRT-Signal beim Vergleich der moralischen mit der nicht-moralischen, aber unangenehmen Bedingung (Moll et al., 02b)..	10
Abbildung 8: Entstehung des BOLD-Signals	16
Abbildung 9: Verlauf des BOLD-Signals nach neuronaler Aktivität	16
Abbildung 10: Schema zum Block-Design	17
Abbildung 11: Schema zum ereigniskorrelierten Design	17
Abbildung 12: Segmentierung des Gehirns und Entfaltung des Kortex	21
Abbildung 13: Antwortzeiten (in ms) 1.Experiment.....	37
Abbildung 14: Gehirnregionen, welche beim Vergleich der Verarbeitung einfacher moralischer Entscheidungen gegenüber der Verarbeitung semantischer Urteile einen signifikanten Unterschied in ihrer Aktivität zeigten.	39
Abbildung 15: Signal-Zeitverläufe.....	41
Abbildung 16: Antwortzeiten (in ms) 2. Experiment.....	42
Abbildung 17: Einschätzung der Schwierigkeit.....	43
Abbildung 18: Einschätzung der Emotionalität	44
Abbildung 19: Einschätzung des Grades der moralischen Verwerflichkeit	45
Abbildung 20: Haupteffekt „Moral“; Gruppenanalyse mit elf Probanden.....	46
Abbildung 21: Signalveränderungen in den aktivierten Regionen im Vergleich des Moralischen Urteilens mit dem semantischen Urteilen	47
Abbildung 22: Vergleich der Bearbeitung von Szenarien ohne Körperverletzung gegenüber Szenarien mit Körperverletzung.....	49

Abbildung 23: Signalveränderungen in Regionen mit einer höheren BOLD-Aktivität bei „Szenarien ohne Gewalt“ gegenüber „Gewaltszenarien“	50
Abbildung 24: ROI-Analyse in der Amygdala - Vergleich der Verarbeitung von „Szenarien ohne Körperverletzung“ gegenüber „Szenarien mit Körperverletzung“	51
Abbildung 25: Signalveränderung in der linken Amygdala.....	52
Abbildung 26: Zweites Experiment - mit der Reaktionszeit kovariierende BOLD-Veränderungen.	53
Abbildung 27: Signalveränderungen in Arealen, die mit der Reaktionszeit kovariieren.....	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Satzbeispiele des ersten Experiments.....	27
Tabelle 2: Einteilung der Satzkategorien	28
Tabelle 3: Satzbeispiele des zweiten Experiments.....	29
Tabelle 4: Aktivierungen im Vergleich des Moralischen Urteils gegenüber dem Semantischen Urteil.....	40
Tabelle 5: Aktivierungen im Vergleich des Semantischen Urteils gegenüber dem Moralischen Urteil.....	40
Tabelle 6: Einschätzung der Schwierigkeit	43
Tabelle 7: Einschätzung der Emotionalität	44
Tabelle 8: Einschätzung des Grades der moralischen Verwerflichkeit.....	45
Tabelle 9: Aktivierungen im zweiten Experiment – Vergleich des Moralischen Urteils mit dem Semantischen Urteil	48
Tabelle 10: Aktivierungen im zweiten Experiment – Vergleich des Semantischen Urteils mit dem Moralischen Urteil.....	48
Tabelle 11: Aktivierungen im zweiten Experiment: Vergleich der Bearbeitung von Szenarien ohne Körperverletzung gegenüber Szenarien mit Körperverletzung.....	50
Tabelle 12: Aktivierung in der linken Amygdala während Szenarien ohne Gewalt im zweiten Experiment – ROI-Analyse der Amygdalae	52
Tabelle 13: Zweites Experiment – Mit der Reaktionszeit kovariierende BOLD-Veränderungen.....	54

Verzeichnis der Internetquellen:

„Brain-Voyager“ (Maastricht, Niederlande, <http://www.brainvoyager.com/>)

„FEAT“ (FMRI Expert Analysis Tool, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/analysis/research/feat/>)

„FSL“ (FMRIB's Software Library, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/fsl>)

„AFNI“ (<http://afni.nimh.nih.gov>)

Abkürzungsverzeichnis

ALM	Allgemeines Lineares Modell
BA	Brodmann-Area
BOLD	Blood-Oxygen-Level-Dependent
dl	dorsolateral
dIPFC	dorsolateraler Präfrontalkortex
EPI	echo planar imaging
ERTS	Experimental Run Time System
FLASH	Fast low angle shot
fMRT	funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie
FOV	field of view
FWHM	Full Width at Half Maximum
lat	lateral
med	medial
MFG	Gyrus frontalis medialis
mm	Millimeter
ms	Millisekunden
MUmK	Moralisches Urteilen mit direkter Körperverletzung
MUoK	Moralisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung
PFC	Präfrontalkortex
ROI	Region of interest
SUmK	Semantisches Urteilen mit direkter Körperverletzung
SUoK	Semantisches Urteilen ohne direkte Körperverletzung
TE	Echo time
TR	time of repetition
vm	ventromedial
vmPFC	ventromedialer Präfrontalkortex

Literaturverzeichnis

- Aalto, S., Naatanen, P., Wallius, E., et al. Neuroanatomical substrata of amusement and sadness: a PET activation study using film stimuli. *Neuroreport* 2002, (Band 13), Seite: 67-73.
- Adolphs, R. Social cognition and the human brain. *Trends Cogn Sci.* 1999, (Band 3), Seite: 469-479.
- Adolphs, R. The neurobiology of social cognition. *Curr.Opin.Neurobiol.* 2001, (Band 11), Seite: 231-239.
- Adolphs, R. Neural systems for recognizing emotion. *Curr.Opin.Neurobiol.* 2002, (Band 12), Seite: 169-177.
- Adolphs, R. Is the human amygdala specialized for processing social information? *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 2003, (Band 985), Seite: 326-340.
- Adolphs, R., Damasio, H. und Tranel, D. Neural systems for recognition of emotional prosody: a 3-D lesion study. *Emotion.* 2002, (Band 2), Seite: 23-51.
- Allison, T., Puce, A. und McCarthy, G. Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends Cogn Sci.* 2000, (Band 4), Seite: 267-278.
- Anderson, S. W., Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D. und Damasio, A. R. Impairment of social and moral behavior related to early damage in human prefrontal cortex. *Nat.Neurosci.* 1999, (Band 2), Seite: 1032-1037.
- Bandettini, P. A., Wong, E. C., Hinks, R. S., Tikofsky, R. S. und Hyde, J. S. Time course EPI of human brain function during task activation. *Magn Reson.Med.* 1992, (Band 25), Seite: 390-397.
- Bar-On, R., Tranel, D., Denburg, N. L. und Bechara, A. Exploring the neurological substrate of emotional and social intelligence. *Brain* 2003, (Band 126), Seite: 1790-1800.
- Baron-Cohen, S., Ring, H. A., Wheelwright, S., et al. Social intelligence in the normal and autistic brain: an fMRI study. *Eur.J.Neurosci.* 1999, (Band 11), Seite: 1891-1898.
- Baxter, M. G., Parker, A., Lindner, C. C., Izquierdo, A. D. und Murray, E. A. Control of response selection by reinforcer value requires interaction of amygdala and orbital prefrontal cortex. *J.Neurosci.* 2000, (Band 20), Seite: 4311-4319.
- Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Haxby, J. V. und Martin, A. Parallel visual motion processing streams for manipulable objects and human movements. *Neuron* 2002, (Band 34), Seite: 149-159.
- Beauregard, M., Levesque, J. und Bourgouin, P. Neural correlates of conscious self-regulation of emotion. *J.Neurosci.* 2001, (Band 21), Seite: RC165.
- Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H. und Anderson, S. W. Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition* 1994, (Band 50), Seite: 7-15.

- Bechara, A., Damasio, H. und Damasio, A. R. Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cereb.Cortex* 2000, (Band 10), Seite: 295-307.
- Bechara, A., Damasio, H. und Damasio, A. R. Role of the amygdala in decision-making. *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 2003, (Band 985), Seite: 356-369.
- Berthoz, S., Armony, J. L., Blair, R. J. und Dolan, R. J. An fMRI study of intentional and unintentional (embarrassing) violations of social norms. *Brain* 2002a, (Band 125), Seite: 1696-1708.
- Berthoz, S., Artiges, E., Van De Moortele, P. F., et al. Effect of impaired recognition and expression of emotions on frontocingulate cortices: an fMRI study of men with alexithymia. *Am.J.Psychiatry* 2002b, (Band 159), Seite: 961-967.
- Blair, R. J. Neurocognitive models of aggression, the antisocial personality disorders, and psychopathy. *J.Neurol.Neurosurg.Psychiatry* 2001, (Band 71), Seite: 727-731.
- Blair, R. J. und Cipolotti, L. Impaired social response reversal. A case of 'acquired sociopathy'. *Brain* 2000, (Band 123 (Pt 6)), Seite: 1122-1141.
- Blair, R. J., Colledge, E. und Mitchell, D. G. Somatic markers and response reversal: is there orbitofrontal cortex dysfunction in boys with psychopathic tendencies? *J.Abnorm.Child Psychol.* 2001, (Band 29), Seite: 499-511.
- Blair, R. J., Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I. und Dolan, R. J. Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger. *Brain* 1999, (Band 122 (Pt 5)), Seite: 883-893.
- Boynton, G. M., Engel, S. A., Glover, G. H. und Heeger, D. J. Linear systems analysis of functional magnetic resonance imaging in human V1. *J.Neurosci.* 1996, (Band 16), Seite: 4207-4221.
- Braver, T. S. und Bongiolatti, S. R. The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *Neuroimage.* 2002, (Band 15), Seite: 523-536.
- Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., et al. Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression. *Neuron* 1996, (Band 17), Seite: 875-887.
- Bremner, J. D., Soufer, R., McCarthy, G., et al. Gender differences in cognitive and neural correlates of remembrance of emotional words. *Psychopharmacol.Bull.* 2001, (Band 35), Seite: 55-78.
- Brett, M., Johnsrude, I. S. und Owen, A. M. The problem of functional localization in the human brain. *Nat.Rev.Neurosci.* 2002, (Band 3), Seite: 243-249.
- Brower, M. C. und Price, B. H. Neuropsychiatry of frontal lobe dysfunction in violent and criminal behaviour: a critical review. *J.Neurol.Neurosurg.Psychiatry* 2001, (Band 71), Seite: 720-726.
- Buchel, C. und Dolan, R. J. Classical fear conditioning in functional neuroimaging. *Curr.Opin.Neurobiol.* 2000, (Band 10), Seite: 219-223.
- Burgess, P. W., Quayle, A. und Frith, C. D. Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia* 2001, (Band 39), Seite: 545-555.

- Canli, T., Desmond, J. E., Zhao, Z. und Gabrieli, J. D. Sex differences in the neural basis of emotional memories. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 2002, (Band 99), Seite: 10789-10794.
- Canli, T., Zhao, Z., Desmond, J. E., Kang, E., Gross, J. und Gabrieli, J. D. An fMRI study of personality influences on brain reactivity to emotional stimuli. *Behav.Neurosci.* 2001, (Band 115), Seite: 33-42.
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M. C., Mazziotta, J. C. und Lenzi, G. L. Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 2003, (Band 100), Seite: 5497-5502.
- Castelli, F., Happe, F., Frith, U. und Frith, C. Movement and mind: a functional imaging study of perception and interpretation of complex intentional movement patterns. *Neuroimage.* 2000, (Band 12), Seite: 314-325.
- Cox, R. W. AFNI: software for analysis and visualization of functional magnetic resonance neuroimages. *Comput.Biomed.Res.* 1996, (Band 29), Seite: 162-173.
- Critchley, H., Daly, E., Phillips, et al. Explicit and implicit neural mechanisms for processing of social information from facial expressions: a functional magnetic resonance imaging study. *Hum.Brain Mapp.* 2000, (Band 9), Seite: 93-105.
- Dale, A. M. Optimal experimental design for event-related fMRI. *Hum.Brain Mapp.* 1999, (Band 8), Seite: 109-114.
- Damasio, A. R. Descartes' error and the future of human life. *Sci.Am.* 1994, (Band 271), Seite: 144.
- Damasio, A. R. Descartes Error: Emotion, Reason, and the Human Brain. 1995,
- Damasio, A. R. The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philos.Trans.R.Soc.Lond B Biol.Sci.* 1996, (Band 351), Seite: 1413-1420.
- Damasio, A. R., Grabowski, T. J., Bechara, et al. Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions. *Nat.Neurosci.* 2000, (Band 3), Seite: 1049-1056.
- Damasio, A. R., Tranel, D. und Damasio, H. Individuals with sociopathic behavior caused by frontal damage fail to respond autonomically to social stimuli. *Behav.Brain Res.* 1990, (Band 41), Seite: 81-94.
- Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M. und Damasio, A. R. The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science* 1994, (Band 264), Seite: 1102-1105.
- Dapretto, M. und Bookheimer, S. Y. Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 1999, (Band 24), Seite: 427-432.
- Davidson, R. J. Anxiety and affective style: role of prefrontal cortex and amygdala. *Biol.Psychiatry* 2002, (Band 51), Seite: 68-80.
- Decety, J. und Chaminade, T. Neural correlates of feeling sympathy. *Neuropsychologia* 2003, (Band 41), Seite: 127-138.
- Di Salle, F., Formisano, E., Linden, D. E., et al. Exploring brain function with magnetic resonance imaging. *Eur.J.Radiol.* 1999, (Band 30), Seite: 84-94.

- Dijksterhuis, A. und Aarts, H. On wildebeests and humans: the preferential detection of negative stimuli. *Psychol.Sci.* 2003, (Band 14), Seite: 14-18.
- Dolan, R. J., Lane, R., Chua, P. und Fletcher, P. Dissociable temporal lobe activations during emotional episodic memory retrieval. *Neuroimage.* 2000, (Band 11), Seite: 203-209.
- Elliott, R., Dolan, R. J. und Frith, C. D. Dissociable functions in the medial and lateral orbitofrontal cortex: evidence from human neuroimaging studies. *Cereb.Cortex* 2000, (Band 10), Seite: 308-317.
- Ernst, M., Bolla, K., Mouratidis, M., et al. Decision-making in a risk-taking task: a PET study. *Neuropsychopharmacology* 2002, (Band 26), Seite: 682-691.
- Eslinger, P. J. und Damasio, A. R. Severe disturbance of higher cognition after bilateral frontal lobe ablation: patient EVR. *Neurology* 1985, (Band 35), Seite: 1731-1741.
- Eslinger, P. J., Grattan, L. M., Damasio, H. und Damasio, A. R. Developmental consequences of childhood frontal lobe damage. *Arch.Neurol.* 1992, (Band 49), Seite: 764-769.
- Eslinger, P. J., Parkinson, K. und Shamay, S. G. Empathy and social-emotional factors in recovery from stroke. *Curr.Opin.Neurol.* 2002, (Band 15), Seite: 91-97.
- Eugene, F., Levesque, J., Mensour, B., et al. The impact of individual differences on the neural circuitry underlying sadness. *Neuroimage.* 2003, (Band 19), Seite: 354-364.
- Evans, A. C. und Collins, D. L. A 305-Member Mri-Based Stereotaxic Atlas for Cbf Activation Studies. *Journal of Nuclear Medicine* 1993, (Band 34), Seite: 70-71.
- Farrow, T. F., Zheng, Y., Wilkinson, I. D., et al. Investigating the functional anatomy of empathy and forgiveness. *Neuroreport* 2001, (Band 12), Seite: 2433-2438.
- Fazel, S. und Danesh, J. Serious mental disorder in 23000 prisoners: a systematic review of 62 surveys. *Lancet* 2002, (Band 359), Seite: 545-550.
- Feinstein, J. S., Goldin, P. R., Stein, M. B., Brown, G. G. und Paulus, M. P. Habituation of attentional networks during emotion processing. *Neuroreport* 2002, (Band 13), Seite: 1255-1258.
- Fink, G. R., Markowitsch, H. J., Reinkemeier, M., Bruckbauer, T., Kessler, J. und Heiss, W. D. Cerebral representation of one's own past: neural networks involved in autobiographical memory. *J.Neurosci.* 1996, (Band 16), Seite: 4275-4282.
- Fletcher, P. C., Frith, C. D., Baker, S. C., Shallice, T., Frackowiak, R. S. und Dolan, R. J. The mind's eye--precuneus activation in memory-related imagery. *Neuroimage.* 1995a, (Band 2), Seite: 195-200.
- Fletcher, P. C., Happe, F., Frith, U., et al. Other minds in the brain: a functional imaging study of "theory of mind" in story comprehension. *Cognition* 1995b, (Band 57), Seite: 109-128.
- Forman, S. D., Cohen, J. D., Fitzgerald, M., Eddy, W. F., Mintun, M. A. und Noll, D. C. Improved assessment of significant activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): use of a cluster-size threshold. *Magn Reson.Med.* 1995, (Band 33), Seite: 636-647.
- Frackowiak, R. S. J., Friston, K. J., Frith, C., et al. Human Brain Function. Academic Press, 2nd edition, 2003. *Human Brain Function.Academic Press, 2nd edition* 2003,

- Frahm, J., Bruhn, H., Merboldt, K. D. und Hanicke, W. Dynamic Mr Imaging of Human Brain Oxygenation During Rest and Photic-Stimulation. *Jmri-Journal of Magnetic Resonance Imaging* 1992, (Band 2), Seite: 501-505.
- Friston, K. J., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. und Turner, R. Characterizing dynamic brain responses with fMRI: a multivariate approach. *Neuroimage*. 1995, (Band 2), Seite: 166-172.
- Frith, C. D. und Frith, U. Interacting minds - a biological basis. *Science* 1999, (Band 286), Seite: 1692-1695.
- Frith, U. Mind blindness and the brain in autism. *Neuron* 2001, (Band 32), Seite: 969-979.
- Fulbright, R. K., Troche, C. J., Skudlarski, P., Gore, J. C. und Wexler, B. E. Functional MR imaging of regional brain activation associated with the affective experience of pain. *AJR Am.J.Roentgenol.* 2001, (Band 177), Seite: 1205-1210.
- Fuster, J. M. Frontal lobe and cognitive development. *J.Neurocytol.* 2002, (Band 31), Seite: 373-385.
- Gallagher, H. L. und Frith, C. D. Functional imaging of 'theory of mind'. *Trends Cogn Sci.* 2003, (Band 7), Seite: 77-83.
- Gallagher, H. L., Happe, F., Brunswick, N., Fletcher, P. C., Frith, U. und Frith, C. D. Reading the mind in cartoons and stories: an fMRI study of 'theory of mind' in verbal and nonverbal tasks. *Neuropsychologia* 2000, (Band 38), Seite: 11-21.
- Garavan, H., Pendergrass, J. C., Ross, T. J., Stein, E. A. und Risinger, R. C. Amygdala response to both positively and negatively valenced stimuli. *Neuroreport* 2001, (Band 12), Seite: 2779-2783.
- Garrett, A. S. und Maddock, R. J. Time course of the subjective emotional response to aversive pictures: relevance to fMRI studies. *Psychiatry Res.* 2001, (Band 108), Seite: 39-48.
- Geday, J., Gjedde, A., Boldsen, A. S. und Kupers, R. Emotional valence modulates activity in the posterior fusiform gyrus and inferior medial prefrontal cortex in social perception. *Neuroimage*. 2003, (Band 18), Seite: 675-684.
- Gilligan, C. In a different voice. *Cambridge, MA: Harvard University Press* 1982,
- Goel, V. und Dolan, R. J. Reciprocal neural response within lateral and ventral medial prefrontal cortex during hot and cold reasoning. *Neuroimage*. 2003, (Band 20), Seite: 2314-2321.
- Goel, V., Grafman, J., Sadato, N. und Hallett, M. Modeling other minds. *Neuroreport* 1995, (Band 6), Seite: 1741-1746.
- Grabowski, T. J., Damasio, H., Tranel, D., et al. Residual naming after damage to the left temporal pole: a PET activation study. *Neuroimage*. 2003, (Band 19), Seite: 846-860.
- Grattan, L. M. und Eslinger, P. J. Long-term psychological consequences of childhood frontal lobe lesion in patient DT. *Brain Cogn* 1992, (Band 20), Seite: 185-195.
- Greene, J. und Haidt, J. How (and where) does moral judgment work? *Trends Cogn.Sci.* 2002, (Band 6), Seite: 517-523.

- Greene, J. D., Sommerville, R. B., Nystrom, L. E., Darley, J. M. und Cohen, J. D. An fMRI investigation of emotional engagement in moral judgment. *Science* 2001, (Band 293), Seite: 2105-2108.
- Haidt, J. The emotional dog and its rational tail: a social intuitionist approach to moral judgment. *Psychol.Rev.* 2001, (Band 108), Seite: 814-834.
- Hamann, S. und Mao, H. Positive and negative emotional verbal stimuli elicit activity in the left amygdala. *Neuroreport* 2002, (Band 13), Seite: 15-19.
- Hamann, S. B., Ely, T. D., Hoffman, J. M. und Kilts, C. D. Ecstasy and agony: activation of the human amygdala in positive and negative emotion. *Psychol.Sci.* 2002, (Band 13), Seite: 135-141.
- Hariri, A. R., Bookheimer, S. Y. und Mazziotta, J. C. Modulating emotional responses: effects of a neocortical network on the limbic system. *Neuroreport* 2000, (Band 11), Seite: 43-48.
- Hariri, A. R., Mattay, V. S., Tessitore, A., et al. Serotonin transporter genetic variation and the response of the human amygdala. *Science* 2002, (Band 297), Seite: 400-403.
- Harlow, J. M. Passage of an iron rod through the head. *Boston Medical and Surgical Journal* 39: 389-393. (Republished in *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neuroscience.*, 11, 281-283) 1848, (Band 11), Seite: 281-283.
- Hauser, M. The liver and the moral organ. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 2006, (Band 1), Seite: 214-220.
- Heeger, D. J. und Ress, D. What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nat.Rev.Neurosci.* 2002, (Band 3), Seite: 142-151.
- Heim, S., Opitz, B. und Friederici, A. D. Distributed cortical networks for syntax processing: Broca's area as the common denominator. *Brain Lang* 2003, (Band 85), Seite: 402-408.
- Houde, O., Zago, L., Crivello, F., et al. Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: evidence from a training paradigm. *Neuroimage.* 2001, (Band 14), Seite: 1486-1492.
- Hume, D. A Treatise of Human Nature. ed.by L.A.Selby-Bigge, second edition by P.H.Nidditch, Oxford: Clarendon Press 1978. 1739,
- Hutcheson, F. An Essay on the Nature and Conduct of the Passions and Affections. With Illustrations on the Moral Sense. *Dublin* 1728,
- Isenberg, N., Silbersweig, D., Engelien, A., et al. Linguistic threat activates the human amygdala. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 1999, (Band 96), Seite: 10456-10459.
- Iwase, M., Ouchi, Y., Okada, H., et al. Neural substrates of human facial expression of pleasant emotion induced by comic films: a PET Study. *Neuroimage.* 2002, (Band 17), Seite: 758-768.
- Jenkinson, M., Bannister, P., Brady, M. und Smith, S. Improved optimization for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. *Neuroimage.* 2002, (Band 17), Seite: 825-841.
- Johnson, S. C., Baxter, L. C., Wilder, L. S., Pipe, J. G., Heiserman, J. E. und Prigatano, G. P. Neural correlates of self-reflection. *Brain* 2002, (Band 125), Seite: 1808-1814.

- Juengling, F. D., Schmahl, C., Hesslinger, B., et al. Positron emission tomography in female patients with borderline personality disorder. *J.Psychiatr.Res.* 2003, (Band 37), Seite: 109-115.
- Kant, I. Grundlegung zur Metaphysik der Sitten. *Zweite Auflage, Riga.* 1786,
- Kesler-West, M. L., Andersen, A. H., Smith, C. D., et al. Neural substrates of facial emotion processing using fMRI. *Brain Res.Cogn Brain Res.* 2001, (Band 11), Seite: 213-226.
- Kiehl, K. A., Smith, A. M., Hare, R. D., et al. Limbic abnormalities in affective processing by criminal psychopaths as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Biol.Psychiatry* 2001, (Band 50), Seite: 677-684.
- Kilts, C. D., Egan, G., Gideon, D. A., Ely, T. D. und Hoffman, J. M. Dissociable neural pathways are involved in the recognition of emotion in static and dynamic facial expressions. *Neuroimage.* 2003, (Band 18), Seite: 156-168.
- Kohlberg, L. Development of Moral Character and Moral Ideology. *Review of Child Development Research* 1964, (Band 1), Seite: 383-431.
- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., et al. Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 1992, (Band 89), Seite: 5675-5679.
- Lane, R. D., Chua, P. M. und Dolan, R. J. Common effects of emotional valence, arousal and attention on neural activation during visual processing of pictures. *Neuropsychologia* 1999, (Band 37), Seite: 989-997.
- Lane, R. D., Fink, G. R., Chau, P. M. und Dolan, R. J. Neural activation during selective attention to subjective emotional responses. *Neuroreport* 1997a, (Band 8), Seite: 3969-3972.
- Lane, R. D., Reiman, E. M., Ahern, G. L., Schwartz, G. E. und Davidson, R. J. Neuroanatomical correlates of happiness, sadness, and disgust. *Am.J.Psychiatry* 1997b, (Band 154), Seite: 926-933.
- Lapierre, D., Braun, C. M. und Hodgins, S. Ventral frontal deficits in psychopathy: neuropsychological test findings. *Neuropsychologia* 1995, (Band 33), Seite: 139-151.
- Lazeron, R. H., Rombouts, S. A., Machielsen, W. C., et al. Visualizing brain activation during planning: the tower of London test adapted for functional MR imaging. *AJNR Am.J.Neuroradiol.* 2000, (Band 21), Seite: 1407-1414.
- Lee, A. C., Robbins, T. W., Graham, K. S. und Owen, A. M. "Pray or Prey?" dissociation of semantic memory retrieval from episodic memory processes using positron emission tomography and a novel homophone task. *Neuroimage.* 2002, (Band 16), Seite: 724-735.
- Leube, D. T., Erb, M., Grodd, W., Bartels, M. und Kircher, T. T. Activation of right fronto-temporal cortex characterizes the 'living' category in semantic processing. *Brain Res.Cogn Brain Res.* 2001, (Band 12), Seite: 425-430.
- Levesque, J., Eugene, F., Joannette, Y., et al. Neural circuitry underlying voluntary suppression of sadness. *Biol.Psychiatry* 2003a, (Band 53), Seite: 502-510.

- Levesque, J., Joanette, Y., Mensour, B., et al. Neural correlates of sad feelings in healthy girls. *Neuroscience* 2003b, (Band 121), Seite: 545-551.
- Liberzon, I., Phan, K. L., Decker, L. R. und Taylor, S. F. Extended amygdala and emotional salience: a PET activation study of positive and negative affect. *Neuropsychopharmacology* 2003, (Band 28), Seite: 726-733.
- Liberzon, I., Taylor, S. F., Fig, L. M., Decker, L. R., Koeppe, R. A. und Minoshima, S. Limbic activation and psychophysiological responses to aversive visual stimuli. Interaction with cognitive task. *Neuropsychopharmacology* 2000, (Band 23), Seite: 508-516.
- Liu, T. T., Frank, L. R., Wong, E. C. und Buxton, R. B. Detection power, estimation efficiency, and predictability in event-related fMRI. *Neuroimage*. 2001, (Band 13), Seite: 759-773.
- Logothetis, N. K. The underpinnings of the BOLD functional magnetic resonance imaging signal. *J.Neurosci.* 2003, (Band 23), Seite: 3963-3971.
- Luke, K. K., Liu, H. L., Wai, Y. Y., Wan, Y. L. und Tan, L. H. Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Hum.Brain Mapp.* 2002, (Band 16), Seite: 133-145.
- Maddock, R. Reply. *Trends Neurosci.* 2000, (Band 23), Seite: 196-197.
- Maddock, R. J. The retrosplenial cortex and emotion: new insights from functional neuroimaging of the human brain. *Trends Neurosci.* 1999, (Band 22), Seite: 310-316.
- Maddock, R. J. und Buonocore, M. H. Activation of left posterior cingulate gyrus by the auditory presentation of threat-related words: an fMRI study. *Psychiatry Res.* 1997, (Band 75), Seite: 1-14.
- Maddock, R. J., Garrett, A. S. und Buonocore, M. H. Posterior cingulate cortex activation by emotional words: fMRI evidence from a valence decision task. *Hum.Brain Mapp.* 2003, (Band 18), Seite: 30-41.
- Manoach, D. S., White, N. S., Lindgren, K. A., et al. Hemispheric specialization of the lateral prefrontal cortex for strategic processing during spatial and shape working memory. *Neuroimage*. 2004, (Band 21), Seite: 894-903.
- Maratos, E. J., Dolan, R. J., Morris, J. S., Henson, R. N. und Rugg, M. D. Neural activity associated with episodic memory for emotional context. *Neuropsychologia* 2001, (Band 39), Seite: 910-920.
- Mayberg, H. S., Liotti, M., Brannan, S. K., et al. Reciprocal limbic-cortical function and negative mood: converging PET findings in depression and normal sadness. *Am.J.Psychiatry* 1999, (Band 156), Seite: 675-682.
- McDermott, K. B., Petersen, S. E., Watson, J. M. und Ojemann, J. G. A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia* 2003, (Band 41), Seite: 293-303.
- Menon, R. S. und Kim, S. G. Spatial and temporal limits in cognitive neuroimaging with fMRI. *Trends Cogn Sci.* 1999, (Band 3), Seite: 207-216.
- Miller, G. Neuroscience. Gene's effect seen in brain's fear response. *Science* 2002, (Band 297), Seite: 319.

- Mitchell, D. G., Colledge, E., Leonard, A. und Blair, R. J. Risky decisions and response reversal: is there evidence of orbitofrontal cortex dysfunction in psychopathic individuals? *Neuropsychologia* 2002, (Band 40), Seite: 2013-2022.
- Moll, J., Eslinger, P. J. und Oliveira-Souza, R. Frontopolar and anterior temporal cortex activation in a moral judgment task: preliminary functional MRI results in normal subjects. *Arq Neuropsiquiatr.* 2001, (Band 59), Seite: 657-664.
- Moll, J., Oliveira-Souza, R., Bramati, I. E. und Grafman, J. Functional networks in emotional moral and nonmoral social judgments. *Neuroimage* 2002a, (Band 16), Seite: 696-703.
- Moll, J., Oliveira-Souza, R. und Eslinger, P. J. Morals and the human brain: a working model. *Neuroreport* 2003, (Band 14), Seite: 299-305.
- Moll, J., Oliveira-Souza, R., Eslinger, P. J., et al. The neural correlates of moral sensitivity: a functional magnetic resonance imaging investigation of basic and moral emotions. *J.Neurosci.* 2002b, (Band 22), Seite: 2730-2736.
- Moll, J., Zahn, R., Oliveira-Souza, R., Krueger, F. und Grafman, J. The neural basis of human moral cognition. *Nature Reviews Neuroscience* 2005, (Band 6), Seite: 799-809.
- Muller, J. L., Sommer, M., Wagner, V., et al. Abnormalities in emotion processing within cortical and subcortical regions in criminal psychopaths: evidence from a functional magnetic resonance imaging study using pictures with emotional content. *Biol.Psychiatry* 2003a, (Band 54), Seite: 152-162.
- Muller, R. A., Kleinhans, N. und Courchesne, E. Linguistic theory and neuroimaging evidence: an fMRI study of Broca's area in lexical semantics. *Neuropsychologia* 2003b, (Band 41), Seite: 1199-1207.
- Mummery, C. J., Patterson, K., Hodges, J. R. und Price, C. J. Functional neuroanatomy of the semantic system: divisible by what? *J.Cogn Neurosci.* 1998, (Band 10), Seite: 766-777.
- Murai, T. und Fujimoto, S. Rapid cycling bipolar disorder after left temporal polar damage. *Brain Inj.* 2003, (Band 17), Seite: 355-358.
- Murphy, F. C., Nimmo-Smith, I. und Lawrence, A. D. Functional neuroanatomy of emotions: a meta-analysis. *Cogn Affect.Behav.Neurosci.* 2003, (Band 3), Seite: 207-233.
- Nakamura, K., Kawashima, R., Sato, N., et al. Functional delineation of the human occipito-temporal areas related to face and scene processing. A PET study. *Brain* 2000, (Band 123), Seite: 1903-1912.
- Narumoto, J., Okada, T., Sadato, N., Fukui, K. und Yonekura, Y. Attention to emotion modulates fMRI activity in human right superior temporal sulcus. *Brain Res.Cogn Brain Res.* 2001, (Band 12), Seite: 225-231.
- Noppeney, U. und Price, C. J. A PET study of stimulus- and task-induced semantic processing. *Neuroimage.* 2002a, (Band 15), Seite: 927-935.
- Noppeney, U. und Price, C. J. Retrieval of visual, auditory, and abstract semantics. *Neuroimage.* 2002b, (Band 15), Seite: 917-926.
- Nyberg, L., Marklund, P., Persson, J., et al. Common prefrontal activations during working memory, episodic memory, and semantic memory. *Neuropsychologia* 2003, (Band 41), Seite: 371-377.

- O'Doherty, J., Kringelbach, M. L., Rolls, E. T., Hornak, J. und Andrews, C. Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex. *Nat.Neurosci.* 2001a, (Band 4), Seite: 95-102.
- O'Doherty, J., Rolls, E. T., Francis, S., Bowtell, R. und McGlone, F. Representation of pleasant and aversive taste in the human brain. *J.Neurophysiol.* 2001b, (Band 85), Seite: 1315-1321.
- Ochsner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J. und Gabrieli, J. D. Rethinking feelings: an fMRI study of the cognitive regulation of emotion. *J.Cogn Neurosci.* 2002, (Band 14), Seite: 1215-1229.
- Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R., et al. Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 1992, (Band 89), Seite: 5951-5955.
- Ohman, A., Lundqvist, D. und Esteves, F. The face in the crowd revisited: a threat advantage with schematic stimuli. *J.Pers.Soc.Psychol.* 2001, (Band 80), Seite: 381-396.
- Partiot, A., Grafman, J., Sadato, N., Wachs, J. und Hallett, M. Brain activation during the generation of non-emotional and emotional plans. *Neuroreport* 1995, (Band 6), Seite: 1397-1400.
- Paulus, M. P. und Frank, L. R. Ventromedial prefrontal cortex activation is critical for preference judgments. *Neuroreport* 2003, (Band 14), Seite: 1311-1315.
- Pelletier, M., Bouthillier, A., Levesque, J., et al. Separate neural circuits for primary emotions? Brain activity during self-induced sadness and happiness in professional actors. *Neuroreport* 2003, (Band 14), Seite: 1111-1116.
- Pelphrey, K. A., Mitchell, T. V., McKeown, M. J., Goldstein, J., Allison, T. und McCarthy, G. Brain activity evoked by the perception of human walking: controlling for meaningful coherent motion. *J.Neurosci.* 2003a, (Band 23), Seite: 6819-6825.
- Pelphrey, K. A., Singerman, J. D., Allison, T. und McCarthy, G. Brain activation evoked by perception of gaze shifts: the influence of context. *Neuropsychologia* 2003b, (Band 41), Seite: 156-170.
- Perry, R. J., Rosen, H. R., Kramer, J. H., Beer, J. S., Levenson, R. L. und Miller, B. L. Hemispheric dominance for emotions, empathy and social behaviour: evidence from right and left handers with frontotemporal dementia. *Neurocase.* 2001, (Band 7), Seite: 145-160.
- Phan, K. L., Liberzon, I., Welsh, R. C., Britton, J. C. und Taylor, S. F. Habituation of rostral anterior cingulate cortex to repeated emotionally salient pictures. *Neuropsychopharmacology* 2003a, (Band 28), Seite: 1344-1350.
- Phan, K. L., Taylor, S. F., Welsh, R. C., et al. Activation of the medial prefrontal cortex and extended amygdala by individual ratings of emotional arousal: a fMRI study. *Biol.Psychiatry* 2003b, (Band 53), Seite: 211-215.
- Phan, K. L., Wager, T., Taylor, S. F. und Liberzon, I. Functional neuroanatomy of emotion: a meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *Neuroimage.* 2002, (Band 16), Seite: 331-348.
- Piaget, J. Das moralische Urteil beim Kinde. *Frankfurt: Suhrkamp (Original 1932)* 1973,

- Pilgrim, L. K., Fadili, J., Fletcher, P. und Tyler, L. K. Overcoming confounds of stimulus blocking: an event-related fMRI design of semantic processing. *Neuroimage*. 2002, (Band 16), Seite: 713-723.
- Pochon, J. B., Levy, R., Fossati, P., et al. The neural system that bridges reward and cognition in humans: an fMRI study. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* 2002, (Band 99), Seite: 5669-5674.
- Price, C. J., Veltman, D. J., Ashburner, J., Josephs, O. und Friston, K. J. The critical relationship between the timing of stimulus presentation and data acquisition in blocked designs with fMRI. *Neuroimage*. 1999, (Band 10), Seite: 36-44.
- Raine, A., Buchsbaum, M. und LaCasse, L. Brain abnormalities in murderers indicated by positron emission tomography. *Biol.Psychiatry* 1997, (Band 42), Seite: 495-508.
- Raine, A., Buchsbaum, M. S., Stanley, J., Lottenberg, S., Abel, L. und Stoddard, J. Selective reductions in prefrontal glucose metabolism in murderers. *Biol.Psychiatry* 1994, (Band 36), Seite: 365-373.
- Raine, A., Lencz, T., Bihrlé, S., LaCasse, L. und Colletti, P. Reduced prefrontal gray matter volume and reduced autonomic activity in antisocial personality disorder. *Arch.Gen.Psychiatry* 2000, (Band 57), Seite: 119-127.
- Raine, A., Meloy, J. R., Bihrlé, S., Stoddard, J., LaCasse, L. und Buchsbaum, M. S. Reduced prefrontal and increased subcortical brain functioning assessed using positron emission tomography in predatory and affective murderers. *Behav.Sci.Law* 1998a, (Band 16), Seite: 319-332.
- Raine, A., Phil, D., Stoddard, J., Bihrlé, S. und Buchsbaum, M. Prefrontal glucose deficits in murderers lacking psychosocial deprivation. *Neuropsychiatry Neuropsychol.Behav.Neurol.* 1998b, (Band 11), Seite: 1-7.
- Ranganath, C., Johnson, M. K. und D'Esposito, M. Prefrontal activity associated with working memory and episodic long-term memory. *Neuropsychologia* 2003, (Band 41), Seite: 378-389.
- Reiman, E. M. The application of positron emission tomography to the study of normal and pathologic emotions. *J.Clin.Psychiatry* 1997, (Band 58 Suppl 16), Seite: 4-12.
- Reiman, E. M., Lane, R. D., Ahern, G. L., et al. Neuroanatomical correlates of externally and internally generated human emotion. *Am.J.Psychiatry* 1997, (Band 154), Seite: 918-925.
- Ritter, P. und Villringer, A. Simultaneous EEG-fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2006, (Band 30), Seite: 823-838.
- Rogers, R. D., Owen, A. M., Middleton, H. C., et al. Choosing between small, likely rewards and large, unlikely rewards activates inferior and orbital prefrontal cortex. *J.Neurosci.* 1999, (Band 19), Seite: 9029-9038.
- Rolls, E. T. The orbitofrontal cortex. *Philos.Trans.R.Soc.Lond B Biol.Sci.* 1996, (Band 351), Seite: 1433-1443.
- Royet, J. P., Zald, D., Versace, R., et al. Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual, and auditory stimuli: a positron emission tomography study. *J.Neurosci.* 2000, (Band 20), Seite: 7752-7759.

- Ruby, P. und Decety, J. What you believe versus what you think they believe: a neuroimaging study of conceptual perspective-taking. *Eur.J.Neurosci.* 2003, (Band 17), Seite: 2475-2480.
- Ruby, P., Sirigu, A. und Decety, J. Distinct areas in parietal cortex involved in long-term and short-term action planning: a PET investigation. *Cortex* 2002, (Band 38), Seite: 321-339.
- Salmon, E., Garraux, G., Delbeuck, X., et al. Predominant ventromedial frontopolar metabolic impairment in frontotemporal dementia. *Neuroimage.* 2003, (Band 20), Seite: 435-440.
- Sander, D., Grafman, J. und Zalla, T. The human amygdala: an evolved system for relevance detection. *Rev.Neurosci.* 2003, (Band 14), Seite: 303-316.
- Shah, N. J., Marshall, J. C., Zafiris, O., et al. The neural correlates of person familiarity. A functional magnetic resonance imaging study with clinical implications. *Brain* 2001, (Band 124), Seite: 804-815.
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C. D., Grasby, P., Frackowiak, R. S. und Dolan, R. J. Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory. *Nature* 1994, (Band 368), Seite: 633-635.
- Shamay-Tsoory, S. G., Tomer, R., Berger, B. D. und Aharon-Peretz, J. Characterization of empathy deficits following prefrontal brain damage: the role of the right ventromedial prefrontal cortex. *J.Cogn Neurosci.* 2003, (Band 15), Seite: 324-337.
- Smith, S. M. Fast robust automated brain extraction. *Hum.Brain Mapp.* 2002, (Band 17), Seite: 143-155.
- Smith, S. M., Jenkinson, M., Woolrich, M. W., et al. Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. *Neuroimage* 2004, (Band 23), Seite: S208-S219.
- Spinella, M. A relationship between smell identification and empathy. *Int.J.Neurosci.* 2002, (Band 112), Seite: 605-612.
- Stark, R., Schienle, A., Walter, B., et al. Hemodynamic responses to fear and disgust-inducing pictures: an fMRI study. *Int.J.Psychophysiol.* 2003, (Band 50), Seite: 225-234.
- Stone, V. E., Baron-Cohen, S. und Knight, R. T. Frontal lobe contributions to theory of mind. *J.Cogn Neurosci.* 1998, (Band 10), Seite: 640-656.
- Strange, B. A., Henson, R. N., Friston, K. J. und Dolan, R. J. Brain mechanisms for detecting perceptual, semantic, and emotional deviance. *Neuroimage.* 2000, (Band 12), Seite: 425-433.
- Sugiura, M., Kawashima, R., Nakagawa, M., et al. Correlation between human personality and neural activity in cerebral cortex. *Neuroimage.* 2000, (Band 11), Seite: 541-546.
- Sugiura, M., Kawashima, R., Nakamura, K., et al. Activation reduction in anterior temporal cortices during repeated recognition of faces of personal acquaintances. *Neuroimage.* 2001, (Band 13), Seite: 877-890.
- Tabert, M. H., Borod, J. C., Tang, C. Y., et al. Differential amygdala activation during emotional decision and recognition memory tasks using unpleasant words: an fMRI study. *Neuropsychologia* 2001, (Band 39), Seite: 556-573.

- Talairach, J und Tournoux, P. Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain: 3-Dimensional Proportional System - an Approach to Cerebral Imaging. *Thieme Medical Publishers, New York, NY* 1988,
- Tanaka, Y., Miyazawa, Y., Hashimoto, R., Nakano, I. und Obayashi, T. Postencephalitic focal retrograde amnesia after bilateral anterior temporal lobe damage. *Neurology* 1999, (Band 53), Seite: 344-350.
- Taylor, S. F., Liberzon, I. und Koeppe, R. A. The effect of graded aversive stimuli on limbic and visual activation. *Neuropsychologia* 2000, (Band 38), Seite: 1415-1425.
- Taylor, S. F., Phan, K. L., Decker, L. R. und Liberzon, I. Subjective rating of emotionally salient stimuli modulates neural activity. *Neuroimage*. 2003, (Band 18), Seite: 650-659.
- Vandenberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O. und Frackowiak, R. S. Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature* 1996, (Band 383), Seite: 254-256.
- Veit, R., Flor, H., Erb, M., et al. Brain circuits involved in emotional learning in antisocial behavior and social phobia in humans. *Neurosci.Lett.* 2002, (Band 328), Seite: 233-236.
- Veltman, D. J., Mechelli, A., Friston, K. J. und Price, C. J. The importance of distributed sampling in blocked functional magnetic resonance imaging designs. *Neuroimage* 2002, (Band 17), Seite: 1203-1206.
- Villringer, A. und Dirnagl, U. Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging. *Cerebrovasc.Brain Metab Rev.* 1995, (Band 7), Seite: 240-276.
- Vogt, B. A., Absher, J. R. und Bush, G. Human retrosplenial cortex: where is it and is it involved in emotion? *Trends Neurosci.* 2000, (Band 23), Seite: 195-197.
- Wicker, B., Perrett, D. I., Baron-Cohen, S. und Decety, J. Being the target of another's emotion: a PET study. *Neuropsychologia* 2003, (Band 41), Seite: 139-146.
- Winston, J. S., O'Doherty, J. und Dolan, R. J. Common and distinct neural responses during direct and incidental processing of multiple facial emotions. *Neuroimage*. 2003, (Band 20), Seite: 84-97.
- Winston, J. S., Strange, B. A., O'Doherty, J. und Dolan, R. J. Automatic and intentional brain responses during evaluation of trustworthiness of faces. *Nat.Neurosci.* 2002, (Band 5), Seite: 277-283.
- Woolrich, M. W., Ripley, B. D., Brady, M. und Smith, S. M. Temporal autocorrelation in univariate linear modeling of FMRI data. *Neuroimage*. 2001, (Band 14), Seite: 1370-1386.
- Wright, C. I., Fischer, H., Whalen, P. J., McInerney, S. C., Shin, L. M. und Rauch, S. L. Differential prefrontal cortex and amygdala habituation to repeatedly presented emotional stimuli. *Neuroreport* 2001, (Band 12), Seite: 379-383.
- Yang, T. T., Menon, V., Eliez, S., et al. Amygdalar activation associated with positive and negative facial expressions. *Neuroreport* 2002, (Band 13), Seite: 1737-1741.
- Zald, D. H. The human amygdala and the emotional evaluation of sensory stimuli. *Brain Res.Brain Res.Rev.* 2003, (Band 41), Seite: 88-123.

Zhang, J. X., Leung, H. C. und Johnson, M. K. Frontal activations associated with accessing and evaluating information in working memory: an fMRI study. *Neuroimage*. 2003, (Band 20), Seite: 1531-1539.

Zysset, S., Huber, O., Ferstl, E. und von Cramon, D. Y. The anterior frontomedian cortex and evaluative judgment: an fMRI study. *Neuroimage* 2002, (Band 15), Seite: 983-991.

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Erklärung

Ich, Helge Schmidt, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Neuronale Korrelate einfacher moralischer Urteilsprozesse“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Helge Schmidt, Berlin, den 25.05.2008

Danksagung

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ein ganz liebes Dankeschön geht an Maschka sowie an Marco, Sue und Klara, und an meine Freunde.

Ich möchte weiterhin herzlichst meiner Arbeitsgruppe am Neuroimaging-Center Berlin danken, insbesondere Herrn Prof. Dr. A. Villringer, Dr. H. R. Heekeren, Dr. I. Wartenburger, T. Mell, A. Marschner, K. Prehn sowie von der juristischen Fakultät der Humboldt Universität Prof. H.-P. Schwintowski und C. Denkler, die mir alle stets hilfreich beiseite standen.