Aus dem Institut für Medizinische Psychologie der Universität München
Vorstand: Prof. Dr. Ernst Pöppel

Neurale Mechanismen "intuitiver" Urteilsprozesse - Eine funktionelle kernspintomographische Untersuchung der impliziten Wahrnehmung semantischer Kohärenz

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Rüdiger Ilg

aus München

2004

Mit der Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

1. Berichterstatter:	Prof. Dr. E. Pöppel
2. Berichterstatter:	Priv. Doz. Dr. K. Bötzel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. J. Herms
	Prof. Dr. P.U. Unschuld
Dekan:	Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2004

Meinen Eltern

Christa und Dr. med. vet. Volker Ilg

„Das unbegreifbarste des Universums ist, dass es begreifbar ist.“
Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **7**

1.1 Ziel der Arbeit 7

1.2 Zum Konzept der Intuition 8

1.2.1 Der Intuitionsbegriff im Sprachgebrauch 8

1.2.2 Der Intuitionsbegriff in der Philosophie 9

1.2.3 Psychologische Intuitionsmodelle 12

1.2.4 Neurobiologische Grundlagen von Intuition 17

1.3 Zielsetzung und Hypothesen 32

1.3.1 Arbeitshypothese 32

1.3.2 Operationalisierung impliziter Entscheidungseigenschaften 33

1.3.3 Experiment 33

2 Material und Methoden **37**

2.1 Versuchspersonen 37

2.2 Versuchsaufbau und Procedere 37

2.3 Wortmaterial 39

2.4 Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) 41

2.5 Experimentelle Einstellungen 47

2.6 Auswertung 48

3 Ergebnisse **53**

3.1 Verhaltensdaten 53

3.2 Funktionelle Bilddaten 55

3.2.1 Beurteilung von semantischer Kohärenz 55

3.2.2 Erkennen von semantischer Kohärenz 57

3.2.3 Implizites Erkennen semantischer Kohärenz 59

3.2.4 Explizites Erkennen semantischer Kohärenz 66

3.2.5 Zusammenfassender Vergleich 68

4 Diskussion **71**

4.1 Aktivierungsmuster 71

4.1.1 Beurteilung und Erkennen semantischer Kohärenz 71

4.1.2 Implizites Erkennen 85

4.1.3 Explizites Erkennen 95

4.2 Methodik 104

4.2.1 fMRT-Messungen mit gesprochener Sprache 104

4.2.2 Kontrollbedingung 105

4.2.3 Versuchsgruppe und Hemisphärendominanz 106

4.2.4 Statistische Methoden 107

4.2.5 Zeitliche Auswertung 108

5 Zusammenfassung **111**

6 Literaturverzeichnis **119**

7 Anhang **137**

1 Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

Entscheidungen im komplexen Kontext beruhen wesentlich auf impliziten Urteilsmechanismen, die dazu dienen, den bewussten Entscheidungsraum einzugrenzen. Ohne diese limitierenden Prozesse wären wir kaum in der Lage, komplexe Alltagsprobleme, welche oft aus einer großen Zahl einzelner Faktoren bestehen, effektiv und in einer verhaltensrelevanten Zeit zu lösen. Selbst wenn wir in konkreten Detailfragen nach einem zurechtgelegten Schema verfahren, erfolgt die Auswahl der angewandten Strategie und der zu berücksichtigenden Kriterien dennoch zunächst "intuitiv" und ohne weitere Begründung. Trotz ihres Anspruchs auf Rationalität beruhen auch wissenschaftliche Hypothesen letztlich auf impliziten Vorannahmen, wie Popper treffend zusammenfasst: „There is no such thing as a logical method of having new ideas, or logical reconstruction of this process. My view may be expressed by saying that every discovery contains an irrational element, or a creative intuition" (Popper 1968).

Obwohl subjektiv evident, ist über den psychologischen Prozess von Intuition und dessen neurobiologische Grundlagen wenig bekannt. Im folgenden soll untersucht werden, in wieweit es möglich ist, den Begriff der Intuition wissenschaftlich zu fassen und experimentell zu instrumentalisieren. Nach einer Bestandsaufnahme der Verwendung des Intuitionsbegriffs in der Philosophie und Psychologie, sowie relevanter Befunde aus der Hirnforschung, werden die empirisch fassbaren Eigenschaften von intuitiven Entscheidungsprozessen isoliert und in einem verhaltensphysiologischen Experiment untersucht. Am Beispiel der Wahrnehmung semantischer Kohärenz werden mit Hilfe funktioneller Kernspintomographie implizite und explizite Wahrnehmungsprozesse verglichen und im Kontext der relevanten Literatur diskutiert.

1.2 Zum Konzept der Intuition

1.2.1 Der Intuitionsbegriff im Sprachgebrauch

„Die Bedeutung eines Wortes ist sein Gebrauch in der Sprache“ (Wittgenstein 1984)

Möchte man die intuitiven Prozessen zu Grunde liegenden kognitiven Prozesse experimentell messen, muss man sich der Frage stellen, in wieweit das theoretische Konstrukt der hinter dem Verhalten vermuteten kognitiven Vorgänge auch der subjektiven Realität entspricht.

Intuition als qualitativ abgrenzbare Erkenntnisqualität erscheint uns subjektiv evident und findet sich in zahlreichen Umschreibungen der Alltagssprache wieder. Typischerweise unterscheidet der Volksmund zwischen "Mit dem Kopf" und "Aus dem Bauch heraus Entscheiden". Dabei werden die sog. "Kopfentscheidungen" auf Nachfragen in der Regel als vernünftig, rational oder logisch beschrieben, während "Bauchentscheidungen" eher mit dem Gefühl der Intuition assoziiert werden. Um zu klären, wovon wir eigentlich reden, wurde der eigentlichen Arbeit eine kleine Umfrage vorangestellt, in der Medizinstudenten der vorklinischen Semester gefragt wurden, welche Eigenschaften ihrer Meinung nach eine intuitive Entscheidung kennzeichnen. In einer freien Textanalyse wurden zunächst alle relevanten Begriffe extrahiert und systematisch geordnet. Die Analyse der Beziehungen der in den Fragebögen genannten Begriffe und Beschreibungen ergab 9 Variablen unter denen sich alle Nennungen subsummieren liessen (s. Anhang Tab. I). Über ihre spezifische Bedeutung hinaus liessen sich die extrahierten Variablen unter 3 allgemeinen Gesichtspunkten zusammenfassen. Danach erfolgen intuitive Entscheidungen 1) "implizit", d.h. ohne Bewusstsein der ausschlaggebenden Faktoren (Begriffe der Explizitheit), 2) "integriert", das heißt als integrierter Erkenntnisakt, der sich nicht weiter zerlegen lässt (Begriffe der Spontaneität), und 3) "gefühlsmäßig", d.h. von einem Gefühl subjektiver Gewissheit begleitet, das typischerweise als "aus dem Bauch heraus" erlebt wird (Begriffe des Gefühls, Verstandes, der Körperlichkeit, Ich-Haftigkeit und Geschlechtlichkeit). Demgegenüber erfolgen rationale Entscheidungen „explizit“, d.h. unter Einbeziehung operationalisierbarer Argumente, „vernünftig“, d.h. explizierbaren Argumenten folgend, und sequentiell, d.h. in einem zeitlich ausgedehnten Prozess der Abwägung der verschiedener Faktoren (s. Abb. 1).

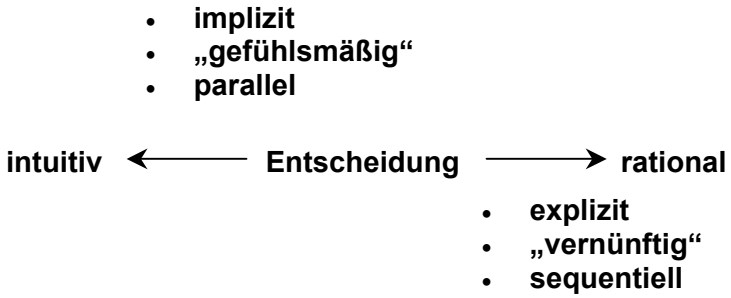


Abb. 1: Entscheidungsmatrix

1.2.2 Der Intuitionsbegriff in der Philosophie

Die Auseinandersetzungen der Philosophie werden von Argumenten des Verstandes ("ratio") und der Intuition ("intuitio") bestimmt (s. Mittelstraß 1995). Der Begriff der Intuition, griechisch "Επιβολή" (später lat. intuitio, intuitus = Anblick, Anschauung) wird zum ersten Mal in der epikureischen Philosophie gebraucht, wo er das schlagartige Erfassen des ganzen Erkenntnisgegenstandes beschreibt und als Gegensatz zur partiellen Erkenntnis angewandt wird, die dessen Teilaspekte betrachtet. Dieses differentielle Begriffsverständnis begründet die spätere Unterscheidung zwischen intuitiver und diskursiver Erkenntnis. Betrachtet man die Verwendung des Begriffs über die Jahrhunderte, findet sich kaum ein Modell, das ohne Intuition auskommt, sei es als inhaltlich tragendes Element oder als pauschale Begründung einer nicht weiter zu hinterfragenden Annahme. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Kontexte seiner Verwendung, lässt sich eine exakte Bedeutung des Intuitionsbegriffs somit nur in seiner individuellen zeitgeschichtlichen Einbettung und im Zusammenhang des ihn beheimatenden philosophischen Denkgebäudes ergründen. Ohne auf den gesamtphilosophischen Kontext und die spezifische werkimmanente Bedeutung einzugehen, werden im folgenden einzelne Gedanken exemplarisch herausgegriffen, um einige grundsätzliche Denkweisen aufzuzeigen.

Geht man zur ursprünglichen Anlage des Begriffs zurück und betrachtet das grundlegende Verhältnis von Intuition und Ratio lassen sich zwei allgemeine Denkweisen erkennen, Intuition im konstitutiven Sinn, und Intuition im verweisenden Sinn:

Intuition im konstitutiven Sinn, wird primär in Bezug auf das unmittelbare Erfassen einfacher Grundwahrheiten gebraucht, die das Ausgangsmaterial der nachfolgenden,

deduktiven Schritte bilden, welche schließlich in einer abstrakten Erkenntnis resultieren.
Intuition im verweisenden oder transzendentalen Sinn, als Fähigkeit, die es ermöglicht, über gegebene Tatsachen hinausreichende Eigenschaften der Welt zu erkennen.

Als paradigmatisch im verweisenden Sinn lässt sich der Intuitionsbegriff Platons anführen. Im Rahmen der Ideenschau (Noesis) beschreibt er Intuition als „geistige Einsicht in das Wesen oder die Idee der Welt". Im Gegensatz zu Wahrnehmung und Verstand ist diese nicht an sinnlich wahrnehmbare Erscheinungen gebunden. Dieser auf das Wesen hinter den Dingen bezogene Intuitionsbegriff findet sich neben **Platon** in weiteren griechischen Schulen (z.B. Plotin, Philon, Proklos) und reicht bis in die moderne Philosophie (z.B. Spinoza, Husserl) nach (Mittelstraß 1995).
Zum Beispiel verwenden **Husserl** und andere Phänomenologen Intuition als erweiterten phänomenologischen Begriff, der von einer intuitiven Erkenntnis des Wesens oder von Wesensschau spricht. Über die bloße Wahrnehmung des Offensichtlichen hinaus wird Intuition als das "in der Anschauung oder Erfahrung des direkt Gegebenen Anwesende" gebraucht, wobei sich "anwesend" im Sinne des Wortes auf das Wesen des Gegebenen bezieht. Demnach empfiehlt Husserl immer da, wo "Gegenständlichkeiten uns ursprünglich zur Anschauung kommen, die Methode der Ideation zu üben und rein intuitive Wesensallgemeinheiten herauszuschauen“, wobei sich dieses allgemeine Wesen, das "Eidos", sowohl in Erfahrungsgegebenheiten, als auch in bloßen Phantasiegegebenheiten exemplifizieren kann (Husserl 1910).
In anderen Schulen, wie bei **Bergson**, steht der Aspekt der "Ganzheitlichkeit" im Vordergrund. Hier wird Intuition als "Erfassen des Gegenstands in seiner Ganzheit", verstanden und als holistischer Ansatz reduktionistischen Erklärungsversuchen gegenüber gestellt, die sich auf methodisch zusammengefügte Einzelbeobachtungen beziehen. Terminologisch unterscheidet Bergson zwischen Intuition und symbolischer Erkenntnis bzw. Analyse. Während letztere, den Gegenstand auf schon bekannte, also diesem und anderen Gegenständen gemeinsame Elemente zurückführt, versucht man sich nach Meinung von Bergson mit Hilfe der Intuition in das betrachtete Objekt hineinzuversetzen um auf diese Weise jene Eigenschaften zu erfassen, die dem Gegenstand innewohnen und daher nicht äußerlich wahrnehmbar sind: "la sympathie par laquelle on se transporte à l'intérieur d'un object pour coincider avec ce qu'il a d'unique et par conséquent d'inexprimable" (Bergson 1941).

Folgt man einem eher transzendentalen Grundverständnis von Intuition, findet intuitives Erkennen primär auf der geistigen Ebene statt, während "alles welthafte, an sinnfällige Gegenstände gebundene Erkennen der menschlichen Seele notwendigerweise diskursiver Natur ist“ (Plotin, nach Ritter und Gründer 1976).

Ganz im Widerspruch dazu bezieht sich Intuition im konstitutiven Sinn gerade auf das unmittelbar Vorhandene und wird im Gegensatz zur Vernunft gebraucht, die Abstraktionen benutzt. Ein derartiges Intuitionsverständnis hat u.a. Schopenhauers Kritik am begrifflichen Denken bestimmt. Während Schopenhauer Intuition als „Erfahrung des hier und jetzt wahrgenommenen“ (Schopenhauer 1998) begreift, agiert in der Kantischen Lehre der Verstand als Organ der unmittelbaren intuitiven Erkenntnis, von der ausgegangen wird, um das intuitiv Erkannte zu reflektieren und in ein abstraktes Wissen zu überführen (nach Hügli und Lübcke 1991).

Dabei war das Verhältnis von „rational“ geprägter Wissenschaft und „Intuition“ nicht immer dialektischer Natur. Im wesentlichen lassen sich zwei Verständnisse von Wissenschaft und Intuition unterscheiden. Zum einen wird Intuition primär in Bezug auf wissenschaftlich nicht erfassbare Bereiche gebraucht und als Gegensatz zu methodisch erworbener Erkenntnis verstanden. Eine Position, die sich vor allem in der Mystik und Religion findet, wie beim spanischen Mystiker Johannes vom Kreuz, der von "einem fried- und liebevollen Einströmen Gottes in die Seele" spricht (Thiele-Dohrmann 1990). Zum anderen wird Intuition als eigentliche erkenntnistheoretische Basis von Wissen betrachtet und als Legitimation der den empirischen Theorien zu Grunde liegenden und nicht weiter zu verifizierenden Grundannahmen gebraucht, wie in der erwähnten Ideenschau Platons (Noesis) und den ersten Sätzen der beweisenden Wissenschaft bei Aristoteles, später bei Spinoza und anderen (Mittelstraß 1995).

Bei Spinoza bildet die Intuition die höchste von insgesamt drei Ebenen des Wissens, die jeweils auf verschiedenen Erkenntnismechanismen beruhen. Zunächst das „gemeinte“ Wissen, das auf Einbildung beruht (opinio), zweitens vernünftiges Wissen (ratio), das auf logischer Analyse fußt und drittens intuitives Wissen, das die Realität direkt in der Beschaffenheit des Betrachteten selbst erfasst. Diese in seinen Augen höchste Form der Erkenntnis beschreibt Spinoza (1677) wie folgt: „Neben diesen beiden Arten der

Erkenntnis (“opinio” und “ratio”), gibt es eine dritte Art, die ich das intuitive Wissen nennen werde. Diese Form der Erkenntnis schreitet von der adäquaten Erkenntnis des formalen Wesens einiger Eigenschaften Gottes fort zur adäquaten Erkenntnis des Wesens der Dinge” (Ethica - De Natura & Origine Mentis, Propositio XL, Scholium II).

Die in den zitierten Beispielen zum Ausdruck kommende unterschiedliche Bewertung intuitiver Erkenntnisprozesse ist dabei nicht nur von begriffshistorischem Interesse, sondern auch von ummittelbarer Relevanz für die angewandten wissenschaftlichen Methoden. In der Regel lassen sich die Zwischenschritte eines Experiments, wie die statistischen Methoden in der folgenden Studie, hinreichend begründen, ihre vordergründige Exaktheit täuscht jedoch häufig über die Modellhaftigkeit der eigentlichen Grundannahmen hinweg. Unabhängig davon, ob man annimmt, dass eine Erkenntnis der Welt nur in der direkten intuitiven Einlassung oder mittels abstrakter Schlussfolgerung möglich sei, bleibt der Betrachter darauf zurückgeworfen, dass letztlich alle angewandten Operationen auf „intuitiven“ Grundannahmen beruhen, die nicht weiter auflösbar scheinen. Die Annahme von Grundvoraussetzungen jedoch, scheint eine wissenschaftliche Auseinandersetzung gerade erst zu ermöglichen, denn ohne eine Einschränkung des Hypothesenraums wäre eine systematische Bearbeitung komplexer Probleme nicht möglich.

1.2.3 Psychologische Intuitionsmodelle

Ähnlich der Philosophie finden sich auch in der Psychologie verschiedenste Intuitionskonzepte, die auf grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen beruhen, von psychodynamisch orientierten Modellvorstellungen wie bei Jung, bis hin zu experimentellen neuropsychologischen Studien. Im folgenden wird im besonderen auf die Untersuchungen von Bowers und Regehr über die implizite Wahrnehmung von semantischer Kohärenz eingegangen, welche den Ausgangspunkt des nachfolgenden Experiments und die Basis der diesem zu Grunde liegenden Annahme von Intuition als impliziten Kohärenzmechanismus bilden.
Jung unterscheidet vier Grundfunktionen des Bewusstseins: die Empfindung, das Denken, das Gefühl und die Intuition. Während Jung Denken und Gefühl (Gefühl im Sinne der prinzipiellen Bewertung von Bewusstseinsinhalten) als primär „rationale Funktionen“ betrachtet, stellen für ihn Empfindung (Empfindung im Sinne der Wahrnehmung von Sinnesreizen) und Intuition „irrationale“ Funktionen dar, die durch unmittelbare

Wahrnehmung zustande kommen und nicht durch Vernunft zu begründen sind (Jung 1993). Er begreift Intuition als instinktive Fähigkeit mögliche Entwicklungen und Optionen wahrzunehmen, welche als fertiges Ganzes erfasst werden. Dabei bezieht sich Intuition auf die Wahrnehmung subliminaler Aspekte, die sich sowohl auf die äußere als auch die innere Welt beziehen können. Interessanterweise sieht Jung auch in den Grundfunktionen des Gefühls und des Denkens intuitive Qualitäten, wenn diese nicht gerichtet, also willkürlich und unbewusst auftreten. In diesem Zusammenhang spricht Jung auch von „intellektueller Intuition“ bzw. „Gefühlsintuition“.

Jungs Vorstellung deckt sich mit der Tatsache, dass intuitive Lösungsansätze nicht nur im Zusammenhang mit scheinbar "rational" nicht lösbaren Problemen vorkommen, sondern auch in klassisch rationalen Disziplinen wie der Mathematik zu finden sind (Tieszen 1989). Fermats berühmtes letztes Theorem lässt sich als prominentes Beispiel anführen. Es dauerte 358 Jahre bis die offensichtliche mathematische Erfahrung, dass es keine Lösung der Formel $x^n + y^n = z^n$ für ganze Zahlen $n \geq 3$ geben kann, am 23 Juni 1993 vom britischen Mathematiker Andrew Wiles bewiesen werden konnte, und das, obwohl die Aussage zuvor schon ganzen Generationen vom Mathematikern intuitiv einleuchtend erschien (Singh 1997). Ein Mathematiker kann ohne zu rechnen spontan das Ergebnis einer Aufgabe abschätzen, ebenso wie der erfahrene Arzt mit seinem geschulten "klinischen Blick" den Verdacht einer bestimmten Krankheit äußern kann, ohne diesen mit einem eindeutigen Symptom begründen zu können (Steuernagel 2001). Es stellt sich also die Frage nach dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen, dieses verschiedene kognitive Domänen überspannenden Phänomens.

Einen grundlegenden Ansatz verfolgen Bowers und Regehr, die Intuition als einen allgemeinen "**Kohärenzerkennungsmechanismus**" betrachten, der die wahrgenommene Primärinformation nach relevanten Zusammenhängen und Analogien scannt. Nach ihrer Ansicht umfasst der Prozess zwei Phasen, ein sog. "lenkendes" (guiding stage) und ein "integratives" (integrative stage) Stadium. Dabei wird die dargebotene Information zunächst nach Kohärenz analysiert und für weitere Operationen aufbereitet. Auf diese Weise werden zunächst unspezifisch relevante Faktoren extrahiert, dem Bewusstsein "präsentiert" und so expliziten Verarbeitungsprozessen zugänglich gemacht. Diese "Integration", der plötzliche Übergang von der unbewussten Verarbeitung ins Bewusstsein,

wird als plötzliche, gestalthafte Wahrnehmung erlebt, die dem allgemeinen Gefühl der Intuition entspricht (Bowers, Regehr et al. 1990).

Dem Kohärenzerkennungsmechanismus liegt der **Gedanke semantischer Netzwerke** zu Grunde, die durch passende Information angeregt werden und über einen Prozess der Aktivierungsausbreitung ("spreading activation", Collins und Loftus 1975) relevante Gedächntnisinhalte aktivieren (Mednick 1962; Simonton 1980; Anderson 1983; Anderson and Pirolli 1984). Ausgangspunkt des Modells waren Beobachtungen im sog. "dyads of triads" (DOT) – task, bei dem es um das implizite Erkennen von semantischer Kohärenz geht. Beim DOT werden zwei Gruppen von drei Wörtern, sog. Worttriaden, gezeigt, die entweder schwach mit einem vierten Wort (dem Lösungswort) assoziiert sein können, d.h. kohärent sind, oder nicht. Die Triaden werden kurz gezeigt (8s bzw. 12s), danach werden die Probanden aufgefordert, das Lösungswort zu nennen bzw. falls ihnen keines einfällt, zumindest die Triade anzugeben, die sie als kohärent vermuten. Aus dem Verhältnis der ungelösten, jedoch korrekt als kohärent erkannten Triaden lässt sich der sog. Guiding Index errechnen. Dabei zeigt sich, dass die Versuchspersonen die kohärenten Triaden signifikant überzufällig häufig erkannten, auch wenn sie das Lösungswort nicht angeben konnten (durchschnittlich in 58% der Fälle, bei einem Gefühl hoher subjektiver Sicherheit sogar in 66%). Die Autoren interpretieren die Ergebnisse so, dass die einzelnen Worte semantische Assoziationen aktivieren, die im Falle der kohärenten Triaden auf ein gemeinsames Wort konvergieren. Dabei scheint bereits die quantitative Summation kohärenter Aktivierungen die Entscheidung zu beinflussen, auch wenn sie noch nicht in dem bewussten Erkennen des gesuchten Wortes resultiert. In einem analogen Versuchsaufbau verwendeten die Autoren stark fragmentierte Bilder, deren Fragmente entweder durcheinander gewürfelt wurden, oder das jeweilige Objekt gerade noch erahnen liessen. Obwohl auch hier ein Großteil der Objekte nicht explizit benannt werden konnte, wurden die Objekte überproportional häufig als solche erkannt, im Gesamtmittel in 60 % der Fälle, bei hoher Konfidenz in 67 % (Bowers, Regehr et al. 1990). In Anlehnung an Popper sehen die Autoren die sog. "guiding" Phase primär im Sinne der Entdeckung von Zusammenhängen, während die "integrative" Phase deren Rechtfertigung dient, d.h. es werden zunächst unbewusst relevante Gedächtnisinhalte aktiviert, die zu einer intuitiven Kohärenzwahrnehmung führen. Erst die daraus resultierenden Hypothesen oder "Anmutungen" werden retrograd analysiert und gerechtfertigt.

Dass intuitive Extrapolationen zwar zeitlich effizient, aber deshalb nicht unbedingt richtig sein müssen, zeigen die Untersuchungen von Tversky und Kahneman (Kahneman and Tversky 1982). Vor allem die **Beurteilung der Wahrscheinlichkeit** von Ereignissen scheint stark an Mustern orientiert und abstrakte logische Regeln zu vernachlässigen. So gehen die meisten Menschen „intuitiv“ davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit mit einer Münze hintereinander zunächst 4 mal Kopf und dann 4 mal Zahl zu werfen (KKKKZZZZ) geringer sein muss wie eine abwechselnde Reihenfolge der gleichen Häufigkeit (z.B. KZZKZKKZ), was mathematisch offensichtlich nicht stimmt (Kahneman and Tversky 1972). In ähnlicher Weise neigen Probanden zu typischen Verknüpfungsfehlern, was das Einschätzen von unbekannten Eigenschaften einer Person betrifft. Nach einer kurzen Schilderung einer unbekannten Person sollten Probanden eine Liste mit möglichen weiteren Eigenschaften nach deren mutmaßlichen Wahrscheinlichkeit ordnen. Dabei wurden stereotype Beschreibungen, die aus mehreren Faktoren bestanden (z.B. "raucht und spielt Klavier") grundsätzlich mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eingeschätzt, wie deren konstituierende Einzelkomponenten (z.B. "raucht" oder "spielt Klavier"), was dem einfachen Verknüpfungssatz der Stochastik widerspricht, nachdem die Wahrscheinlichkeit des kombinierten Auftretens zweier Ereignisse nicht größer sein kann als die entsprechenden Einzelwahrscheinlichkeiten, d.h. $P(A\&B) \leq P(A)$ (Tversky and Kahneman 1981). Die Beispiele zeigen, dass intuitive Urteile durchaus systematischen Fehlern unterliegen können und weisen darauf hin, dass intuitive Urteile über musterartige Erkennungsprozesse funktionieren. Das würde erklären, warum ein ganz spezielles Muster, wie im Beispiel des Münzexperiments, als unwahrscheinlicher angesehen wird, als ein zufällig anmutendes, während im Gegensatz dazu bei der Einschätzung persönlicher Eigenschaften gerade besonders typische Konstellationen, die ein konkret vorstellbares Bild ergeben, wahrscheinlicher angesehen werden als allgemeine.

Im Sinne des Kohärenzerkennungsmodells würden also zunächst kohärente Teileigenschaften erfasst und von diesen ausgehend auf einen paradigmatischen Prototyp geschlossen. Dieser ist zwar abstrakt gesehen weniger wahrscheinlich als seine Einzeleigenschaften, jedoch von größerer Verhaltensrelevanz, da erst die über die eigentlich verfügbare Information hinaus gehende Vorurteilsbildung ein entsprechend angepaßtes und vorausplanendes Handeln ermöglicht. Tversky und Kahneman gehen davon aus, dass sich die Beurteilung von konkreten Problemen nicht an abstrakten Regeln der Wahrscheinlichkeitstheorie orientiert, sondern an typischen Mustern, subjektiven

Erfahrungswerten und sozialen Erwartungshaltungen, welche die Handlungsorientiertheit der menschlichen Kognition verdeutlichen (Tversky and Kahneman 1983). Peterson und Beach gehen grundsätzlich davon aus, dass kognitive Entscheidungen in komplexen, kaum determinierten Situationen, auf statistischen Operationen beruhen, die sich in Anpassung an eine unsichere Umwelt entwickelt haben, um ein erfolgreiches, vorausschauendes Verhalten zu gewährleisten (Peterson and Beach 1967).

Einen ähnlichen Ansatz wie Bowers und Regehr vertreten Perrig, Wippich und Perrig-Chielo in ihrer **Rahmentheorie unbewusster Verhaltenssteuerung**. Sie unterscheiden zwischen einem perzeptuellen und einem konzeptionellen Gedächtnis. Während im perzeptuellen Gedächtnis Reizinformation zunächst automatisch verarbeitet und gespeichert wird, werden im konzeptionellen Gedächtnis episodische Erfahrungen und deren im Erleben repräsentierte bewusste Bedeutung abgelegt. Nach Ansicht der Autoren funktionieren diese beiden Gedächtnisformen nach unterschiedlichen Grundmechanismen, einer assoziativen Reaktion und einer konstruktiven Interpretation. Die assoziative Reaktionsfunktion besteht in einer automatischen, sensorischen Form der Informationsverarbeitung, die ohne bewusstes Erkennen auf Reize reagiert und Reiz-Reaktionsmuster speichert. Diese Reiz-Reaktionsverbindungen bilden den Inhalt des perzeptuellen Gedächtnis und dienen der Wahrnehmung identischer Reize und der Ausführung von damit assoziierten Reaktionen. Sie können Perrig zufolge nur "bottom-up", d.h. inputgetrieben reaktiviert werden, z.B. wenn ein Reiz erneut dargeboten wird, wie beim Wiederholungs-Primingeffekt (Schacter 1992). Das bewusste Erleben wird hingegen durch die konstruktive Interpretationsfunktion vermittelt. Hier werden die individuellen Ereignisse bewertet und gespeichert. Im Gegensatz zur passiven Reaktionsfunktion speichert die Interpretationsfunktion aktiv generierte konzeptuelle Repräsentationen, die nicht von sensorischen Ereignissen getriggert sind. Intuitives Erleben entsteht nach dem Modell von Perrig et al. dadurch, dass bestimmte Vorgänge der Interpretationsfunktion mit Prozessen der Reaktionsfunktion kovariieren, die perzeptuellen Repräsentationen aber noch keinem klaren Konzept zugeordnet werden können (Perrig, Wippich et al. 1993).
Als weitere Beispiele impliziter Informationsverarbeitung lassen sich Funktionen des impliziten Lernens (Reber 1993; Liebermann 2000), unterschwelliger Wahrnehmungs- und Inkubationseffekte anführen (s. z.B. Pöppel, Held et al. 1973; Posner 1973).

1.2.4 Neurobiologische Grundlagen von Intuition

Über die neuralen Grundlagen von intuitiven Entscheidungsprozessen ist wenig bekannt. In den einschlägigen psychologischen, medizinischen und neurobiologischen Datenbanken finden sich verschiedene Studien zu spezialisierten automatischen Teilleistungen, die im Sinne der Theorie von Bowers und Regehr als Beispiele intuitiver Funktionen gewertet werden können. Allerdings gibt es kaum Untersuchungen über mögliche, den unterschiedlichen impliziten Fertigkeiten zu Grunde liegende, gemeinsame neurobiologische Mechanismen. Versucht man Intuition als Gesamtphänomen zu fassen, lässt sie sich also zunächst einmal als Summe impliziter Teilfunktionen beschreiben, die sich auf verschiedene Aspekte zu lösender Aufgaben beziehen. Im folgenden werden verschiedene neurobiologische Teilfunktionen zusammengefasst, die im weiteren Sinn an intuitiven Erkenntnisprozessen beteiligt sind und somit zu unserem Gesamtrepertoire intuitiver Erkenntnisfähigkeit beitragen. In erster Linie sind dies automatisierte Wahrnehmungsmechanismen komplexer verhaltensrelavanter Information, von der Interpretation von Gesichtsausdrücken, über die Analyse komplexer sozialer Situationen, implizite Wahrnehmung von Wahrscheinlichkeitszusammenhängen, bis hin zur Fähigkeit der ästhetischen Wahrnehmung.

Intuition als Resultat implizit gelernter Wahrscheinlichkeitszusammenhänge

Als Basis „intuitiver“ Entscheidungen werden implizit gelernte Wahrscheinlichkeits-zusammenhänge vermutet.
In einem Experiment sollten Versuchspersonen so schnell wie möglich entscheiden, in welchem von vier Quadranten ein bestimmter Stimulus erschien. Das Experiment bestand aus mehreren Durchgängen, wobei das Entdecken des Zielstimulus (target) im letzten Durchgang durch mehrere Distraktoren erschwert wurde. Was die Probanden nicht wussten war, dass die Lokalisation des target von der Reihenfolge der Lokalisation der Stimuli in den vorausgehenden Durchgängen abhing. Obwohl den Probanden zu keiner Zeit irgendein prädiktives Muster bewusst war, stellte sich heraus, dass das target nach einer gewissen Trainingszeit signifikant schneller erkannt wurde. Eine darauffolgende Änderung der Vorhersagesequenz führte zu einer eindeutigen Verlängerung der Antwortzeit, was darauf hinwies, dass der beobachtete Effekt auf das implizite Lernen des Zusammenhangs zwischen Vorhersagemuster und Targetlokalisation zurückzuführen sein musste und nicht

durch blosses Training der Aufgabe als solcher zu erklären war (Lewicki, Czyzewska et al. 1987). Dass das implizite Erkennen von Zusammenhängen nicht auf motorisches Lernen beschränkt ist, wird an den Experimenten mit künstlicher Grammatik deutlich (Reber 1967; Reber 1969). Hierbei lernen Probanden sinnlose Wörter aus Konsonanten auswendig (z.B. XTRLTRJ), die einem komplexen Algorithmus folgen, der den Versuchspersonen nicht bewusst ist. Sollen die Teilnehmer danach entscheiden, ob die Wörter einer neuen Liste dieser fiktiven Grammatik entsprechen oder nicht, liegen sie überproportional richtig, obwohl sie die Regeln der Grammatik in keinster Weise explizieren können (Knowlton, Ramus et al. 1992). Weitere Experimente haben gezeigt, dass sich das Phänomen impliziter Grammatiken auch auf andere Stimuli und Modalitäten übertragen lässt (Manza and Reber 1997).

In der Zusammenschau verschiedener Studien, scheint das implizite Lernen von Zusammenhängen im wesentlichen auf dem Erkennen von Kovarianz und Häufigkeitszusammenhängen zu beruhen. Wie das implizite Lernen von Kovarianz zur Hypothesen- und Vorurteilsbildung im sozialen Kontext beiträgt, zeigt ein Experiment von Lewicki, in dem Versuchspersonen auf der Basis eines Bildes und einer Liste weiterer Eigenschaften bestimmte Persönlichkeitseigenschaften von Personen einschätzen sollten. Dabei wurden die Bilder so gewählt, dass bestimmte Eigenschaften mit der Haarlänge der gezeigten Personen korrelierten. In der nachfolgenden Testphase zeigte sich, dass die Beurteilung der implizit gelernten Eigenschaften eindeutig durch die Haarlänge der beurteilten Personen beeinflusst wurde, obwohl die Teilnehmer ihre Entscheidung auf Nachfrage mit objektiven Argumenten zu begründen suchten (Lewicki 1986).

Die Rolle der Basalganglien beim impliziten Lernen von Zusammenhängen

Eine entscheidende Rolle im Prozess des impliziten Lernens wird den Basalganglien zugeschrieben, welche die subkortikalen Kerne des Endhirns, namentlich das Striatum mit Nucleus caudatus und Putamen, den Globus Pallidus, das Claustrum und die Amygdala umfassen (Duus 1995). Mit ihrem komplexen neuronalen Verschaltungsmuster, dopaminergen Feedbacksystem und ihren ausgeprägten korticostriatalen Verknüpfungen scheinen sich die Basalganglien besonders zur Kodierung und Dekodierung komplexer crossmodaler Information zu eignen. Der kortikalen Komponente entsprechend werden fünf **kortikostriatale Schleifen** („cortico-striatal loops“) beschrieben, wobei den frontalen und limbischen Verknüpfungen eine besondere kognitive Bedeutung beikommt:

- **Dorsolaterale Schleife** über den dorsolateralen Anteil des präfrontalen Kortex (BA 9 und 10) und posterior parietale Areale
- **Limbische Schleife** über den vorderen Gyrus cinguli (BA 24), Hippokampus und Amygdala
- **Orbitofrontale Schleife** über den medialen (BA 12) und lateralen (BA 11) orbitofrontalen Kortex und das vordere Cingulum
- **Motorische Schleife** über supplementärmotorische und somatosensorische Areale
- **Okkulomotorische Schleife** über das frontale Augenfeld, dorsolateral präfrontale und posterior parietale Anteile

Alle Schleifen verlaufen von den entsprechenden kortikalen Arealen, durch das Striatum (Nucleus caudatus und Putamen), den Globus pallidus (GP), die Substantia nigra (überwiegend pars reticulata, SNr) und über den Thalamus zurück. Neben dieser „direkten" Verbindung über den Globus pallidus und die Substantia nigra wird ausserdem ein „indirekter" Pfad über den Globus pallidus externus (GPe), Nucleus subthalamicus und Globus pallidus internus (GPi) beschrieben (Burruss, Hurley et al. 2000; Liebermann 2000). Während der direkte Pfad über eine verminderte GABAerge Hemung des Thalamus zu einer vermehrten Aktivierung der thalamokortikalen Verbindung führt, resultiert die Aktivierung des Nucleus subthalamicus in einer reduzierten thalamischen Aktivität (Chow and Cummings 1999).
Die komplexe Verschaltung der Basalganglien mit verschiedenen kortikalen Arealen legt nahe, dass in jedem Teil der Schleifen zwar die gleiche Information prozessiert wird, allerdings unter verschiedenen Gesichtspunkten.

Die kognitiven Funktionen der Basalganglien lassen sich an Patienten mit degenerativen Erkrankungen der Basalganglien untersuchen, insbesondere bei Morbus Parkinson und Chorea major Huntington, bei denen es zu einer frühen Schädigung des Striatum kommt. Während beim idiopathischen Parkinson-Syndrom die Degeneration dopaminerger Neurone der Pars compacta der Substantia nigra im Vordergrund steht, dominiert bei Huntington-Patienten die Atrophie des Striatum mit selektivem Verlust der Projektionsneurone zum Globus pallidus externus und Nucleus subthalamicus.
Die Rolle der Basalganglien beim Erlernen von Verhalten und speziellen Fertigkeiten ist aus tierexperimentellen Studien bekannt (Mishkin, Malamut et al. 1984).

Lieberman unterscheidet zwei grundlegende Funktionen der Basalganglien, die sog. nichtbewusste Verarbeitung („nonconscious processing“) und die vorhersagende Sequenzierung („predictive sequencing“). Unter unbewusster Verarbeitung fasst er jene Prozesse zusammen, die zunächst unter bewusster Kontrolle des präfrontalen Kortex stehen, im Zuge des Lernens jedoch zunehmend automatisiert werden, um schließlich unbewusst über das Striatum abzulaufen (McClelland, McNaughton et al. 1995; Ashby, Alfonso-Reese et al. 1998). Mit vorhersagendem Sequenzieren wird die Fähigkeit beschrieben, Teilaspekte von Handlungsabläufen oder komplexen Mustern zu identifizieren, einem übergeordneten Kontext zuzuordnen und der Abfolge entsprechend zu ergänzen. Caine berichtet von einer Reihe von Huntington-Patienten, die nicht mehr in der Lage waren, seit langem gelernte berufliche Tätigkeiten in der richtigen Reihenfolge auszuführen, wobei ihnen die einzelnen Bestandteile der Handlungen durchaus erinnerlich waren (Caine, Hunt et al. 1978). Aufgrund dieser und ähnlicher Berichte, geht man davon aus, dass die Basalganglien über eine Verschaltung verfügen, die bereits bei der Aktivierung eines spezifischen Teils einer komplexen raumzeitlichen Informationsfolge in einer Aktivierung des Gesamtmusters resultiert (Rumelhart and McClelland 1986). Dass diese Prozesse unbewusst ablaufen, wird an Studien mit amnestischen Patienten deutlich, die spiegelverkehrte Worte erkennen sollten. Zwar konnten sich die Patienten auch nach mehreren Durchgängen nicht an die bereits gezeigten Worte erinnern, erkannten diese jedoch signifikant schneller (Cohen and Squire 1980).

Liebermann hat verschiedene Studien über implizites, bzw. procedurales Lernen bei Parkinson und Huntington-Patienten analysiert, die verschiedene Entscheidungs-Reaktions-Tests, Lesen von Spiegelschrift, den Pursuit rotor task, Tower of London und Aufgaben mit künstlicher Grammatik umfassten. In 25 von 30 Fällen wurde eine eindeutige Beeinträchtigung festgestellt (Choice RT, Serial RT, Pursuit rotor, Tower of London, Probabilistic classification). Bei Aufgaben mit ausgeprägter motorischer Komponente lassen sich die kognitiven Defizite schwer von den rein motorischen Störungen unterscheiden. Untersuchungen des Serial Reaction Task (SRT), bei dem auf das Erscheinen eines target in vier möglichen Quadranten reagiert werden soll, zeigen jedoch, dass die deutliche Beeinträchtigung der Parkinson- und Huntington-Patienten, nicht nachgewiesen werden konnte, wenn die Erscheinungssequenz der Stimuli explizit verfügbar war (Dominey, Ventre-Dominey et al. 1996). Auf ein allgemeines

Sequenzierungsdefizit deutet auch die Beobachtung hin, dass die Schwierigkeiten bei der Ausführung motorischer Aufgaben deutlich zunehmen, wenn diese in einer bestimmten Reihenfolge ausgeführt werden sollen (Benecke, Rothwell et al. 1987). Weitere Studien über die Rolle der Basalganglien beim impliziten Lernen werden im Zusammenhang mit dem nachfolgenden Experiment diskutiert.

Intuition als assoziative Evaluation komplexer Zusammenhänge

Die eigentliche kognitive Analyse der implizit gelernten Zusammenhänge läuft vermutlich über die zwischengeschalteten kortikalen Areale, vor allem des präfrontalen Kortex.
Was der Ausfall spontaner Entscheidungsfähigkeit für den Alltag bedeuten kann, zeigen Patienten mit präfrontalen Hirnschäden, die neben allgemein unadäquatem Sozialverhalten auch unter ausgeprägten Entscheidungsschwierigkeiten leiden. Das berühmteste Beispiel hierfür ist die legendäre Geschichte des Eisenbahnarbeiters Phineas P. Gage, dem bei einer Explosion im Sommer 1848 eine umherfliegende Eisenstange den Gesichtsschädel durchbohrte. Nachdem er seine Verletzung wie durch ein Wunder ohne erkennbare Folgen überlebt hatte, wunderte sich der behandelnde Arzt Dr. Harlow mit zunehmender Rekonvaleszenz seines Patienten über dessen merkwürdig verändertes Sozialverhalten, das gar nicht zu seinen vorherigen Charakterzügen zu passen schien. Während sich Gage vor seinem Unfall durch seine „besonnene Wesensart" ausgezeichnet hatte und bei den Menschen, die ihn kannten, „als gerissener, kluger Geschäftsmann, der alle seine Pläne energisch und ausdauernd in die Tat umsetzte“ galt, beobachtete er ihn nun „launisch, respektlos, fluchte manchmal auf abscheulichste Weise, was früher nicht zu seinen Gewohnheiten gehörte, erwies seinen Mitmenschen wenig Achtung, reagierte ungeduldig auf Einschränkungen und Ratschläge, wenn sie seinen Wünschen zuwiderliefen, war gelegentlich entsetzlich halsstarrig, und doch launenhaft und wankelmütig, machte ständig Zukunftspläne, die er, kaum gefaßt, schon wieder fallenließ" (Harlow 1848; Harlow 1868).

Zusammen mit seiner Frau Hanna hat Antonio Damasio 1994 den Schädel, der im Harvard Medical Museum aufbewahrt wurde, untersucht und den Hirnschaden rekonstruiert. Ausgehend von der Schädelverletzung und dem Unfallmechanismus, kann demzufolge eine primäre Schädigung des ventromedialen (=orbitofrontalen) präfrontalen Kortex vermutet werden. Eine Lokalisation die gut mit den Defekten einer Reihe von Patienten mit Frontalhirnschäden korrelierte, die generell ähnliche Symptome aufwiesen (Damasio,

Grabowski et al. 1994). In mehreren Fällen wurden folgende Symptome beschrieben: frontaler Antriebsmangel, teilweise Minderung der intellektuellen Fähigkeiten, Gleichgültigkeit und Selbstzufriedenheit, ungenügende bis keinerlei Zukunftsplanung, kindliche Heiterkeit, Neigung zur Witzelsucht, Vernachlässigung von Pflichten, sexuelle Enthemmung, Frivolität und Neigung zu unangemessenen Bemerkungen, sowie Entscheidungsprobleme bis zur Entscheidungsunfähigkeit, v.a. im sozialen Kontext (Damasio, Tranel et al. 1990; Bechara, Damasio et al. 1994; Damasio 1995; Bechara, Tranel et al. 1996; Anderson, Bechara et al. 1999). Die klinischen Symptome der beschriebenen Patienten werden inzwischen unter dem Syndrom der erworbenen Sozialinkompetenz (Acquired Sociopathy) zusammengefasst, das zunehmend Eingang in die Literatur findet (Saver und Damasio 1991; Tranel 1994; Blair und Cipolotti 2000).

Das der mangelnden intuitiven Situationsanalyse zu Grunde liegende Defizit kommt im sog. Wisconsin Card Sorting Test (WCST) zum Ausdruck. Im Rahmen eines "Glücksspiels" werden die Probanden aufgefordert, Spielkarten von zwei verschiedenen Stapeln zu ziehen, wobei verschiedene Karten unterschiedlich belohnt, bzw. bestraft werden. Nach einer Weile stellt sich heraus, dass zwar der eine Stapel höhere Einzelgewinne verspricht, sich jedoch der andere Stapel auf lange Sicht mehr auszahlt (Milner 1963; Nelson 1976). Interessanterweise tendieren gesunde Probanden schon bevor sie den Unterschied zwischen den Stapeln bemerken „intuitiv" dazu, vom „besseren" Stapel zu ziehen, während orbitofrontal geschädigte Patienten trotz steigender Verluste beim schlechten Stapel verharren (Anderson, Damasio et al. 1991). Dieses auf den Primärreiz konzentrierte Verhalten, dass sich auch im sprunghaften Alltagsverhalten zeigt, korreliert mit einer mangelnden emotionalen Bewertung der Situation, die sich mit Hilfe der sog. emotionalen Hautwiderstandsänderung (SCR = Skin Conductance Response) messen lässt. Diese Hautwiederstandsänderungen werden als Zeichen einer emotionalen Aktivierung des sympathischen Nervensystems verstanden und scheinen an eine intakte Funktion des ventromedialen präfrontalen Kortex (im speziellen der orbitofrontalen Anteile), Teilen des limbischen Systems (Gyrus cinguli anterior, rechte vordere Insel) und der rechten unteren Parietalregion gebunden (Tranel and Damasio 1994; Critchley, Elliott et al. 2000).

Intuition im sozialen Kontext

In einem Übersichtsartikel untersucht Liebermann intuitive Wahrnehmungsphänomene im sozialen Kontext. Er geht davon aus, dass die Fähigkeit, komplexe soziale Information integriert wahrzunehmen und zu interpretieren im wesentlichen auf der Möglichkeit beruht, verhaltensrelevante nonverbale Information auszudrücken und zu analysieren. Die Zusammenhänge komplexer, überlappender Information und deren Bedeutung werden nach Ansicht von Liebermann implizit gelernt und über die Basalganglien kodiert und dekodiert (Liebermann 2000).
Teilfeatures wie Gesichtsausdrücke oder Prosodie werden in spezialisierten, automatischen Wahrnehmungsprozessen dekodiert und als komplexes Muster wahrgenommen, das als Einheit evaluiert und mit stereotypen Mustern verglichen wird.
Ein Großteil unseres Urteilens und Verhaltens im sozialen Kontext wird von Vorurteilen geleitet (Gilbert and Malone 1995). Zwar sind die Stereotypen, in denen wir unsere Mitmenschen wahrnehmen, offensichtlich nicht immer richtig, ermöglichen es uns aber, das Verhalten und die Motivation unseres Gegenüber über die eigentlich vorhandene Information hinaus zu interpretieren und effektiv einzuschätzen (Devine 1989; Kunda und Thagard 1996).

Als Beispiel für den hohen Automatisierungsgrad der „intuitiven“ Verarbeitung sozialer Information lassen sich zahlreiche Studien über die implizite Wahrnehmung nonverbaler Information zitieren. So berichtet Liebermann von einer Studie von Rosenthal, die zeigen konnte, dass Gesichtsausdrücke schon ab einer Präsentationszeit von 5 ms erkannt werden können (Rosenthal, Hall et al. 1979, nicht verifiziert). Es ist bekannt, dass bereits minimale Änderungen der Gesichtsproportionen wahrgenommen werden (Lewicki 1986). In einer neueren Studie hat sich gezeigt, dass selbst kleinste Momentaufnahmen emotionaler Ausdrucksbewegungen in der richtigen Reihenfolge geordnet werden können (Edwards 1998). In einer Studie über die Beurteilung der pädagogischen Fähigkeiten von Lehrern stellte sich heraus, dass die Beurteilung von 6s-Video Ausschnitten zu 71% mit der Bewertung von Studenten korrelierte, die bei dem entsprechenden Lehrer ein ganzsemestriges Seminar besucht hatten (Ambady and Rosenthal 1993).
In Bezug auf die Kommunikation nonverbaler Stimuli ist zu ergänzen, dass offensichtlich nicht nur deren Dekodierung automatisch und größtenteils unbewusst erfolgt, sondern auch die Enkodierung, das heißt die Übersetzung und Sichtbarmachung unserer eigenen Gefühle

und Motivationen in ein äußerlich sichtbares Signal. In der Regel sind wir uns unseres gegenwärtigen Ausdrucksverhaltens nicht oder kaum bewusst und können weite Teile unseres Verhaltens, wie unsere Stimmlage, Gestik und Mimik nicht und selbst mit Training nur teilweise beherrschen (Barr und Kleck 1995; Ekman und Friesen 1969). In der Regel sind wir in erster Linie auf das Ziel unseres Verhaltens konzentriert und uns des zum Erlangen dieses Zieles notwendigen Verhaltens nur bedingt bewusst. Wollen wir zum Beispiel jemandem anderen gefallen, konzentrieren wir uns in erster Linie darauf, einen guten Eindruck zu machen, und nicht auf das eigentliche Verhalten. Indem wir unbewusst das Verhalten unseres Gegenübers interpretieren, generieren wir fortlaufend Hypothesen über dessen mutmaßliche Erwartungshaltung, der wir spontan folgen, ohne dass wir uns tatsächlich entscheiden, an dieser oder jenen Stelle zu lachen, uns Zurückzulehnen, oder ähnliches. Grammer und Kollegen haben das Flirtverhalten von Erwachsenen untersucht und dabei eine Reihe von zeitlich gekoppelten, immer wieder auftretenden Verhaltensmustern identifiziert, die den beteiligten Personen in keiner Weise bewusst waren, z.B. „Mann lehnt sich zurück, Frau fährt sich durchs Haar, Frau berührt ihr Gesicht“ (Grammer, Kruck et al. 1998). Komplexe Ausdrucksformen bewusst vorzuspielen ist bekanntlich schwierig und in der Regel weniger überzeugend und vertrauenserweckend als spontane Gefühlsäußerungen (Schlenker and Weigold 1992).
DePaulo fasst den intentionalen Charakter von Ausdrucksbewegungen treffend zusammen:
„Instead of trying deliberately to lean forward, smile, and gaze, people probably instead try to convey an impression of liking, with the leaning and smiling and gazing following from that, perhaps even out of their awareness.“ (DePaulo 1992).

Intuition zur Eingrenzung des Entscheidungsraumes

Die Rolle der beteiligten Systeme fasst Damasio in seinem sog. Somatic-Marker-Modell zusammen (Damasio 1996). Er geht davon aus, dass der präfrontale Kortex Konvergenzzonen enthält, in denen vorher kategorisierte komplexe Situationen (situation-patterns) mit adäquaten Emotionen assoziiert werden. Situationen werden zunächst kategorisiert und im sensorischen Kortex repräsentiert. Diese „bildhafte“ Repräsentation wirkt auf den ventromedialen präfrontalen Kortex, der einen adäquaten somatosensorischen Zustand im Körper aktiviert, den wir schließlich als adäquates Gefühl empfinden (Somatic Marker). Ob diese Aktivierung direkt (via Hypothalamus → sympathisches Nervensystem) oder über einen „as if body loop“ geschieht, der das entsprechende Gefühl vorgaukelt, lässt

Damasio offen. Demnach würde eine Entscheidung also nicht allein nach rationalen Gesichtspunkten, sondern unter Einbeziehung eines körperlichen Feedbacks getroffen. An der Generierung des körperlichen Feedbacks scheinen im wesentlichen das limbische System und die Amygdala beteiligt zu sein (Tranel and Damasio 1994).

Der Sinn eines derartigen Mechanismus könnte in einer Einschränkung des Entscheidungsraums liegen, ohne die das Gehirn alle Optionen gleichwertig in Betracht ziehen müßte. Ein derart uneingeschränktes Vorgehen würde in einem überaus schwierigen und langsamen Entscheidungsprozeß resultieren und bereits gemachte Erfahrungen vernachlässigen. In Bereichen, in denen große Unsicherheit über die Zukunft besteht - wie im sozialen Kontext - könnten die körperlichen Marker helfen, den Entscheidungsraum einzugrenzen und in ihrer Kapazität limitierten expliziten Operationen zugängig zu machen. Während sich dieses Feedback-System ursprünglich als Verhaltenswegweiser im Sinne des „basic survival“ entwickelt hat, wurde es weiterentwickelt, um in intellektuellen Entscheidungsprozessen zu assistieren, indem es Komponenten, die eine erfahrungsgemäß wichtige oder gefährliche Rolle spielen, hervorhebt und so den Prozeß der Entscheidungsfindung im abstrakten Bereich navigiert.

Neben den erwähnten subkortikalen Schleifen, verfügt der präfrontale Kortex zudem über ausgeprägte Verbindungen zum parietalen, temporalen und occipitalen Kortex, im speziellen zum motorischen, paralimbischen und sekundären visuellen System (Chow and Cummings 1999; Burruss, Hurley et al. 2000). Mit Hilfe seiner ausgeprägten kortikalen und subkortikalen Verbindungen scheint der präfrontale Kortex somit ideal für die Assoziation und Evaluation von Information verschiedener kognitiver Domänen prädestiniert.

Dabei zeigen Untersuchungen an Menschenaffen, dass die Aktivierung des orbitofrontalen Kortex weder von der Sinnesqualität des Stimulus noch von dessen primären Eigenschaften abhängig scheint. Der orbitofrontale Kortex von Primaten beinhaltet den sekundären Geschmacks- und Riechkortex, der Geschmäcker und Gerüche analysiert und deren Belohnungs- bzw. Bestrafungswert repräsentiert. Über ausgeprägte Verbindungen zum visuellen Kortex werden hier primär neutrale visuelle Stimuli mit positiven oder negativen Verstärkern assoziiert. Funktionelle Kernspinuntersuchungen konnten zeigen, dass die Aktivierung entsprechender orbitofrontaler Strukturen reziprok mit dem Sättigungsgrad der

Versuchstiere korreliert. Während die Präsentation von Gerüchen nicht verzehrter Speisen eine gleichbleibende Aktivierung hervorrief, nahm die Aktivität in Bezug auf Speisen, die gerade verzehrt worden waren, deutlich ab, so dass nicht die Qualität des Stimulus, sondern seine Attraktivität den Ausschlag zu geben scheint (Doherty, Rolls et al. 2000). Eine ähnliche Interpretation legt eine Studie von Francis und Rolls nahe, die eine deutliche orbitofrontale Aktivierung durch angenehme Berührung zeigt (Francis, Rolls et al. 1999). Aufgrund dieser Ergebnisse wird angenommen, dass im orbitofrontalen Kortex primäre Ereignisse mit ähnlichen Erfahrungen verglichen und entsprechenden Verstärkern assoziiert werden (Rolls 2000). Diese These lässt sich gut mit der Funktion des orbitofrontalen Kortex in Damasios Somatic-Marker-Modell vereinbaren und würde die Symptome frontalhirngeschädigter Patienten dahingehend erklären, dass diese demnach nicht mehr in der Lage sind, die beschriebenen assoziativen Verbindungen zu knüpfen, auf diese Weise emotionale Erfahrungen zu berücksichtigen und ihr Verhalten so wechselnden Bedingungen anzupassen.

Erkennen von Gesichtern und Gefühlsausdrücken

Zum Vermögen, komplexe Situationen intuitiv einschätzen zu können, tragen verschiedene automatische Wahrnehmungsprozesse bei, welche unsere Entscheidungen unbewusst beeinflussen und bestimmen.

Im sozialen Bereich sind hier vor allem die bereits erwähnten, auf verhaltensrelevante Stimuli spezialisierten, Anteile des limbischen Systems zu nennen, wie die „Gesichtserkennungsneurone“ im basalen akzessorischen Kern der Amygdala (Leonard, Rolls et al. 1985; Young, Aggleton et al. 1995; Adolphs, Tranel et al. 1998). Eine außerordentlich interessante Patientin konnten Young et al. untersuchen. Nach partieller bilateraler Amygdalotomie hatte sie neben allgemeinen Wortfindungsstörungen Probleme, postoperativ gelernte Gesichter wiederzuerkennen und emotionale Gesichtsausdrücke sowie Blickrichtungen zu interpretieren (Young, Aggleton et al. 1995). Sie war unfähig Gesichtsausdrücke zuzuordnen, wobei sie verschiedene Gesichtsausdrücke teilweise als unterschiedliche Identität interpretierte (Young, Hellawell et al. 1996). Trotz normalen Hörvermögens zeigte sie Schwierigkeiten, Intonations-Muster, vor allem den Ausdruck von Furcht und Ärger, wahrzunehmen und zu interpretieren, so dass hier eine allgemeine Verarbeitungsstörung emotionaler Information vorzuliegen schien (Scott, Young et al. 1997). In einem anderen Test sollten Patienten mit totalen bilateralen Amygdalaschäden

fremde Gesichter nach deren Zugänglichkeit und Vertrauenswürdigkeit beurteilen. Dabei bewerteten Patienten fremde Gesichter durchwegs zugänglicher und vertrauenswürdiger als gesunde Kontrollpersonen, am auffälligsten bei Gesichtern die von Kontrollpersonen am negativsten beurteilt wurden (Adolphs, Tranel et al. 1998). Diese Befunde passen zu funktionellen PET-Studien bzw. Kernspinuntersuchungen, die während des Betrachtens ängstlicher Gesichtsausdrücke eine gesteigerte, bei glücklichen Gesichtsausdrücken eine verminderte Amygdalaaktivierung beschreiben (Morris, Frith et al. 1996; Phillips, Young et al. 1997; Morris, Friston et al. 1998).

Die ToM-Debatte – Intuition als implizite Simulation der Gedanken anderer

Eine weitere Grundvoraussetzung intuitiven Handelns im sozialen Kontext ist die Antizipation und Interpretation der Gedanken und Gefühle unserer Mitmenschen. Um sich anzupassen oder eigene Ziele zu erreichen, muss man zunächst die Meinungen und Absichten der anderen mit einbeziehen. In der "theory of mind" (TOM)-Debatte der vergangenen Jahre werden zwei mögliche Strategien des "Mindreading" diskutiert (Flavell 1999; Schulkin 2000). Während die sog. Theoristen davon ausgehen, dass die Interpretation mentaler Zustände im Prinzip auf einer abstrakten Theoriebildung beruht und auf theoretische Konstrukte zurückgreift, gehen die Simulationisten im wesentlichen davon aus, dass sich der Beobachter zunächst in den Beobachteten hineinversetzt, die Situation nachempfindet und aus seinen eigenen Gefühlen und Gedanken schließt, wie der Beobachtete fühlen oder denken muss (Gallese and Goldman 1998; Adolphs 1999). Der Ansatz der Simulationisten beruht auf der Beobachtung sog. Mirror-Neurone, die im prämotorischen Kortex von Affen beobachtet wurden und dort sowohl an der Analyse als auch Exekution von zielgerichteten Bewegungen beteiligt sind (Gallese, Fadiga et al. 1996; Rizzolatti, Fadiga et al. 1996; Rizzolatti and Fadiga 1998; Rizzolatti, Fadiga et al. 1999). Experimente mit transkranieller Magnetstimulation und funktioneller Kernspintomographie scheinen eine ähnliche Doppelfunktion der beobachteten Areale beim Menschen zu bestätigen (Fadiga, Fogassi et al. 1995; Buccino, Binkofski et al. 2001).

Auf Basis dieser Beobachtungen gewinnt auch eine Fallbeschreibung von Lhermitte eine neue Bedeutung, der 1986 ein Reihe von Patienten mit pathologischem Imitationsverhalten untersucht hatte, die ein zwanghaftes Nachahmungsverhalten zeigten, das sich auf fokale Schädigungen des frontalen Kortex zurückführen ließ (Lhermitte, Pillon et al. 1986). Im Sinne der Simulationstheorie könnte bei diesen Patienten aufgrund einer gestörten frontalen

Hemmung, die normalerweise die Exekution der simulierten Verhaltens- und Bewegungsmuster verhindert, die ungefilterte Funktion gestischer Mirror-Neurone beobachtet worden sein (Fadiga, Fogassi et al. 1995).

Unabhängig von den diskutierten Erklärungsmodellen weisen Studien an Patienten und Gesunden darauf hin, dass der frontale Kortex, insbesondere der mediale präfrontale Kortex, eine zentrale Rolle bei der Interpretation mentaler Zustände anderer zu spielen scheint (Frith and Frith 1999). So fand Stuss, dass Patienten mit mediofrontalen Hirnschäden Schwierigkeiten hatten, betrügerisches Verhalten zu erkennen, d.h. sich eine Vorstellung über die eigentliche Motivation der beobachteten Person zu bilden. Happe und Kollegen berichten über einen Patienten mit bipolarer affektiver Störung, der sich auf Grund ausgeprägter depressiver Beschwerden einer Stereotaktischen Anterioren Capsulotomie (SAC) unterzogen hatte und in Folge dieser Operation erhebliche Defizite in klassischen "Theory of Mind"-Tests zeigte (Happe, Malhi et al. 2001; Anm.: bei der SAC werden thalamo-orbitofrontale Bahnen des fronto-striato-pallido-thalamischen Systems verödet, die eine Rolle bei affektiven Störungen, insbesondere Angststörungen spielen). Ähnliche Ergebnisse ergab eine Studie an 31 frontalhirngeschädigten Patienten die zeigen konnte, dass die beobachteten "Theory of Mind"-Störungen nicht mit exekutiven Störungen des Frontalhirns korrelierten (Rowe, Bullock et al. 2001). Auch wenn keine allgemeine Korrelation zwischen TOM-Performance und EC-Performance (executive control) gezeigt werden konnte, scheinen dennoch einzelne Parameter zu korrelieren (Saltzman, Strauss et al. 2000), so dass über eine Abhängigkeit von TOM-Funktionen und exekutiven Funktionen diskutiert wird (Perner and Lang 1999).
Weitere Hinweise ergeben sich aus bildgebenden Experimenten der vergangenen Jahre. In unabhängigen PET-und fMRI-Studien zeigte sich eine mediofrontale Aktivierung bei TOM-abhängigen Aufgaben (Fletcher, Happe et al. 1995; Goel, Grafman et al. 1995; Gallagher, Happe et al. 2000). In einer ERP-Studie (Event Related Potential) wurde ebenfalls eine fokale linksfrontale Aktivierung registriert (Sabbagh and Taylor 2000).

Die Bedeutung des frontalen Kortex für die "theory of mind"-Bildung wird auch in Studien an autistischen Kindern deutlich. Ähnlich wie orbitofrontal geschädigte Patienten (Stone, Baron-Cohen et al. 1998) zeigen Kinder mit Asperger-Syndrom und HFA (High functioning autism) deutliche Beeinträchtigungen in TOM-Tests (Baron-Cohen, M et al.

1999; Buitelaar, van der Wees et al. 1999; Jolliffe and Baron-Cohen 1999), die mit verminderten orbitofrontalen Flußraten (Ohnishi, Matsuda et al. 2000) bzw. verminderter orbitofrontaler Aktivierung (Happe, Ehlers et al. 1996) einhergehen. In einer fMRI-Untersuchung an schizophrenen Patienten zeigte sich ebenfalls eine verminderte linkspräfrontale Aktivierung (Russell, Rubia et al. 2000) nachdem sich zuvor gezeigt hatte, dass es auch bei symptomatischen Patienten mit Schizophrenie zu einer Beeinträchtigung der TOM-Leistung kommt (Frith and Corcoran 1996).

Interessanterweise scheint die Fähigkeit, Meinungen oder Absichten von Mitmenschen zu extrapolieren nicht auf einzelne Individuen beschränkt, sondern auch im Kontext komplexer Gesellschaften zu funktionieren. Noelle-Neumann vom Institut für Demoskopie Allensbach hat sich aus Sicht der Meinungsforschung mit dem Prozess der Meinungsbildung und dessen sozialen Mechanismen beschäftigt. In ihren jahrelangen Erhebungen hat sie eine ausgeprägte Furcht vor sozialer Isolation beobachtet, die sie in ihrer Theorie der Schweigespirale beschreibt. Die Theorie der Schweigespirale geht davon aus, dass die Gesellschaft vom Konsensus abweichende Individuen mit Isolation bedroht, die angeborenerweise gefürchtet wird. "Diese Isolationsfurcht veranlasst sie, sich ständig zu vergewissern, was an Meinungen und Verhaltensweisen in der Umwelt gebilligt und was missbilligt wird, und welche Meinungen und Verhaltensweisen zunehmen und welche abnehmen. Die Theorie spricht von einem quasistatistischen Sinn, mit dem die Menschen diese Abschätzung vornehmen. Das Ergebnis dieser Einschätzung beeinflusst ihr Reden und Verhalten.“ (Noelle-Neumann 2000).

Ästhetisches Empfinden

Eng mit dem Begriff der Intuition sind auch Faktoren des ästhetischen Empfindens und des persönlichen "Geschmacks" verknüpft. Hier sind nicht nur geschlechtsspezifische Unterschiede bekannt, sondern auch unterschiedliche "Neigungen" der einzelnen Hemisphären. In seitengetrennten Untersuchungen ästhetischer Präferenzen wurde festgestellt, dass die rechte Hirnhälfte abstrakte, neue und ungewöhnliche Konstellationen bevorzugt, während das linke Gehirn eher zu bekannten und realistischen Inhalten tendiert (Rentschler 1988; Strachan 2000). Kunst-Wilson und Zajonc konnten zeigen, dass kurz zuvor gezeigte Figuren - obwohl nicht bewusst wahrgenommen - in der Auswahl gegenüber neuen Objekten bevorzugt wurden (Kunst-Wilson and Zajonc 1980). Regard und Landis

wiederholten das Experiment mit Gesichtern in einer nach Gesichtsfeld getrennten Anordnung und fanden, dass zwar die linke Hemisphäre bekannte Gesichter vorzieht, jedoch die rechte Hirnhälfte eindeutig neue Gesichter bevorzugt (Regard and Landis 1988). Zahlreiche Unterschiede in Bezug auf weitere Faktoren sind bekannt. Es gibt Hinweise, dass die rechte Hemisphäre eher globale Reizaspekte verarbeitet, während die linke Hirnhälfte eher auf lokale Merkmale spezialisiert scheint. Sergent nahm ein Experiment von Navon auf (Navon 1977), bei dem es darum geht, innerhalb einer Anordnung von großen Buchstaben, die wiederum aus kleinen Buchstaben zusammengesetzt sind, bestimmte "Zielbuchstaben" zu entdecken. Dabei konnten die "targets" sowohl auf der globalen Ebene (große Buchstaben) als auch lokal (kleine Buchstaben) präsentiert sein. Während die Versuchspersonen bei den "global" angeordneten Stimuli schneller reagierten, wenn der Reiz der rechten Hemisphäre dargeboten wurde, zeigten sich für die lokalen "targets" schnellere Reaktionszeiten der linken Hemisphäre (Sergent 1982). Ähnliche Ergebnisse ergeben sich in Bezug auf die Differenzierungsfähigkeit von Gesichtsmerkmalen (z.B. "Anordnung von Augen, Nase und Mund" vs. "Nasenform") mit einer Präferenz der rechten Hemisphäre für globale Unterschiede und der linken für lokale Details (Bradshaw and Nettleton 1981).

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die rechte Hemisphäre eher eine Begabung für das Erkennen holistischer Zusammenhänge aufweist, während die linke Hemisphäre mehr auf lokale Diskriminationsaufgaben spezialisiert scheint. Nachdem sich bereits auf der Ebene der primären Wahrnehmung von Objekteigenschaften deutliche Unterschiede zeigen, kann vermutet werden, dass sich die linke und rechte Gehirnhälfte auch bei komplexen intuitiven Urteilsprozessen, die auf einer Vielzahl impliziter Urteilsmechanismen beruhen, unterschiedlich verhalten würden. Diesbezügliche Studien liegen jedoch nicht vor, so dass hier nur spekuliert werden kann.

Zusammenfassung

Die dargestellten Funktionen stellen sicher nur einen Bruchteil aller impliziten und damit im Sinne der eingangs erwähnten Definition intuitiven Mustererkennungsprozesse dar. Sie laufen automatisch ab und scannen komplexe Situation nach spezialisierten Teilaspekten. Das sich aus der Summe dieser autonomen Teilfunktionen ergebende Gesamtmuster wird mit der Erfahrung verglichen und entsprechend beurteilt. Während wir gewohnt sind,

einfache implizite Funktionen, wie das Erkennen von Gesichtsausdrücken, als angeboren zu sehen und als Wahrnehmung von Tatsachen zu akzeptieren, erscheint uns die integrierte Wahrnehmung komplexer Muster als „Eingebung“ oder „Intuition“, da wir uns potentiell in der Lage wähnen, das entsprechende Geschehen verstandesgemäß zu zerlegen und rational zu analysieren, gleichzeitig jedoch einen spontanen Eindruck der Situation wahrnehmen, der uns eine integrierte Beurteilung ermöglicht.

Der präfrontale Kortex, Teile des limbischen Systems und der Basalganglien nehmen zentrale Funktionen der impliziten sozialen Interaktion wahr. Als Teil des limbischen Assoziationskortex scheint der orbitofrontale Kortex eingehende Reize verschiedener Sinnesqualitäten nach ihrem emotionalen Gehalt zu analysieren und zu bewerten, indem er ein adäquates körperliches Feedback (Marker) generiert, das sich in Form von sympathisch vermittelten Hautwiderstandsänderungen messen lässt. Patienten mit orbitofrontalen Hirnschäden haben Schwierigkeiten, diese Antwort zu empfinden und in ihrer Analyse und Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Sie können emotionale Ausdrücke von Stimme und Mimik nur ungenügend interpretieren und neigen zur Fehleinschätzung komplexer Situationen. Im Alltag äußern sich diese Schwierigkeiten in mangelnder emotionaler Antizipation und auffälligen Entscheidungsproblemen. Die Betroffenen haben Probleme, veränderte Versuchs- bzw. Umweltbedingungen wahrzunehmen und ihr Verhalten entsprechend anzupassen. Während die Amygdala vorwiegend negative Gefühle wie Angst und Ärger wahrzunehmen scheint, wird eine Aktivierung des orbitofrontalen Kortex vor allem durch Präsentation positiver Stimuli, wie wohlschmeckende Gerüche und angenehm empfundene Berührung beobachtet. Über ausgeprägte Verbindungen zum visuellen Kortex scheint der orbitofrontale Kortex primär neutrale, visuelle Reize mit Erfahrungswerten zu vergleichen und entsprechenden Verstärkern zu assoziieren. In Bezug auf die Phylogenese des Gehirns könnte also zunächst eine Art archaisches Frühwarnsystem entstanden sein (Amygdala), während sich mit zunehmenden kommunikativen Anforderungen eine Art Belohnungssystem entwickelt hat, das verhaltensrelevante Information bewertet und unsere Motivation und unser Verhalten im komplexen Zusammenhang navigiert (präfrontaler Kortex). Eine weitere wichtige Rolle beim impliziten Lernen und Erkennen komplexer Muster spielen die Basalganglien, welche die zentrale Schaltstelle verschiedener frontaler Verarbeitungsschleifen bilden. Studien deuten darauf hin, dass im Striatum mit seinen weitreichenden crossmodalen kortikalen Verknüpfungen koinzident auftretende

Informationen registriert und über ein dopaminerges Verstärkungssystem gelernt wird, welches das neuronale Korrelat komplexer Mustererkennungsprozesse bildet. In der Summe der beschriebenen Teilleistungen scheint der frontale Kortex einschließlich seiner subkortikalen Schaltstellen und ausgeprägten assoziativen parietalen und temporalen Verbindungen eine zentrale Rolle bei der unbewussten Exekution und Interpretation von Verhalten und ähnlichkeitsbasierten Analyse komplexer Information zu spielen.

1.3 Zielsetzung und Hypothesen

In der Gesamtschau der erwähnten philosophischen Modelle, psychologischen Untersuchungen und neurobiologischen Befunde, lassen sich folgende Eigenschaften von intuitiven Urteilsprozessen festhalten:

> *Mit Intuition wird allgemein die Fähigkeit beschrieben, Urteile oder Entscheidungen über Reizaspekte oder Zusammenhänge zu fällen, ohne sich der Grundlage dieser Entscheidungen bewusst zu sein. Erst das Ergebnis des zu Grunde liegenden impliziten Prozesses wird bewusst und kann expliziert werden. Die intuitive Erkenntnis erscheint dem Erkennenden unmittelbar mit dem Erkannten verknüpft und von einem Gefühl subjektiver Gewissheit begleitet.*

1.3.1 Arbeitshypothese

Um den Faktor „Intuition“ in einem Experiment zu operationalisieren, müssen also folgende Eigenschaften berücksichtigt werden: Eine intuitive Entscheidung muss "implizit" und "integriert" erfolgen, d.h. ohne explizites Wissen von den der Entscheidung zu Grunde liegenden Faktoren und im Gegensatz zur diskursiven Erkenntnis (die als Grundlage der rationalen Entscheidung angesehen wird) ohne bewusste Folgerung expliziter Zwischenschritte. Der Nichtverbalisierbarkeit der Entscheidungsstrategie kommt eine definierende Rolle zu, da intuitive Entscheidungen ebenfalls zu einem klar definierten Ergebnis führen, der Entscheidungsprozess an sich jedoch nicht nachvollziehbar ist. Während die Art der Entscheidung an sich („Wie ?“) verstehbar ist („intuitiv"), bleibt der Grund der Entscheidung („Warum ?“) verborgen. Demnach erwarten wir für die Annahme, dass eine rational begründete Entscheidung getroffen wurde, obligatorisch eine explizite, verbalisierbare Begründung. Im Gegensatz dazu darf sich die Begründung einer intuitiven

Entscheidung lediglich auf die Beschreibung der Entscheidungsstrategie an sich, oder damit verknüpfte, subjektive Eigenschaften beziehen, d.h. unter Bewusstsein der Tatsache erfolgen, dass andere Menschen in einer ähnlichen Situation eventuell anders urteilen würden.

1.3.2 Operationalisierung impliziter Entscheidungseigenschaften

Will man die verschiedenen Urteilsprozessen zu Grundeliegende Hirnaktivität mit funktionellen Bildgebungsmethoden untersuchen, muss man Aufgaben verwenden, die sich idealerweise nur in Bezug auf eine Zielgröße, in diesem Fall den Urteilsmodus (implizit vs. explizit), unterscheiden. Ist diese Zielgröße an sich jedoch komplex und durch mehrere Teileigenschaften definiert, wie im vorliegenden Fall, entsteht der Konflikt, ob man in der Absicht einer möglichst ganzheitlichen Erfassung des Grundbegriffs alle Teilvariabeln variiert und dabei konfundierende Effekt in Kauf nimmt, oder zu Gunsten der Trennschärfe einen Teilaspekt der Zielgröße herausgreift und damit das Gesamtkonstrukt vernachlässigt. In Bezug auf ein solches Experiment kann man sich also entweder auf die Ausprägung des zu messenden Zustands konzentrieren, d.h. eine möglichst intuitive mit einer möglichst rationalen Fragestellung vergleichen und so hinnehmen, dass auch andere, allein durch die verschiedene Natur der Fragen bedingte Variablen miterfasst werden. Oder man verwendet sehr trennscharfe Aufgaben, die sich nur in einem einzigen Faktor unterscheiden, so dass sich die beobachtete Aktivität zwar schlüssig auf die variierte Variable zurückführen lässt, jedoch nur einen Teilaspekt dessen erfasst, was unter dem Gesamtkonstrukt verstanden wird. Um die resultierenden Ergebnisse den verschiedenen beteiligten kognitiven Teilfunktionen zuordnen zu können, muss also das zu messende Konstrukt in möglichst trennscharfe Teilfaktoren zerlegen werden, um diese getrennt variieren, messen und damit letztlich statistisch vergleichen zu können.

1.3.3 Experiment

Basierend auf den vorausgehenden Überlegungen soll also ein Experiment durchgeführt werden, dass in allen Bedingungen auf einer identischen Aufgabe beruht, jedoch die Möglichkeit bietet, zwischen einer expliziten und impliziten Lösung zu unterscheiden. Diese Unterscheidung sollte am besten a posteriori erfolgen, d.h. sich allein auf das Verhalten des Probanden beziehen, um definitionsbedingte Fehler oder Verfälschungen der Bedingungen zu vermeiden. Daraus ergibt sich folgender Ansatz.

Implizite versus explizite Beurteilung semantischer Kohärenz

Basierend auf dem Experiment von Bowers und Regehr und den darauf aufbauenden Untersuchungen von Bolte und Goschke (Bolte 1999), die den Einfluß von Stimmungen auf die intuitive Wahrnehmung semantischer Kohärenz untersucht haben, wurde folgendes Experiment entwickelt: Einer Versuchsperson werden drei Wörter gezeigt, woraufhin diese entscheiden soll, ob die gezeigten Worte (eine Triade) zusammengehören, d.h. kohärent sind, oder nicht, oder ob es sich um eine Kontrolltriade aus sinnlosen Pseudowörtern handelt. Dabei wird der Proband angehalten, so spontan wie möglich zu antworten (sog. "forced choice" task) und so gut es geht ein mögliches Lösungswort nennen, z.B. "Ziege, hoch, grün" — "ja" — "Berg". Die einzelnen Worte sind bewusst schwach aber eindeutig mit dem Lösungswort assoziiert und werden nur kurz gezeigt (1,6 s). Auf diese Weise werden vier experimentelle Bedingungen beobachtet: 1) der Proband entscheidet "inkohärent", 2) der Proband entscheidet "kohärent" und kann ein Lösungswort angeben (explizite Wahrnehmung semantischer Kohärenz), 3) der Proband entscheidet "kohärent", kann jedoch nicht angeben warum (implizite Wahrnehmung semantischer Kohärenz) und 4) der Proband entscheidet „Kontrolltriade“. Die Auswertung erfolgt in einem sog. event-related design, das heißt die Antwort des Probanden bestimmt, ob die gemessene Hirnaktivierung als implizites oder explizites Erkennen von Kohärenz gewertet wird. Auf diese Weise bleibt sowohl das Stimulusmaterial als auch die gestellte Aufgabe über alle Bedingungen gleich, so dass sich der Unterschied zwischen der impliziten und der expliziten Bedingung allein aus der individuellen Antwort des Probanden ergibt und sich so "ideal" herausrechnen lässt. Im Vergleich der semantischen vs. nichtsemantischen Analyse (kohärent/inkohärent gegen baseline) lässt sich zudem die dem Kohärenzerkennungs-modell von Regehr zu Grunde liegende Annahme semantischer Netzwerke untersuchen. In der statistischen Auswertung können also folgende Faktoren untersucht werden (s. Abb. 2):

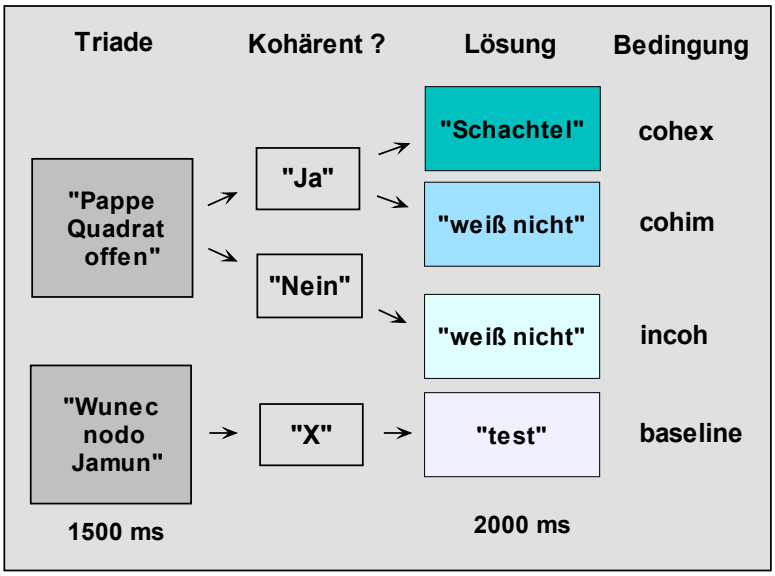


Abb. 2: Experimentelle Bedingungen

2 Material und Methoden

2.1 Versuchspersonen

An der Studie nahmen 15 rechtshändige, gesunde Probanden aus dem akademischen Umfeld teil (Durchschnittsalter 25, 21 bis 43 Jahre). Alle Versuchspersonen waren deutschsprachiger Herkunft, bzw. seit früher Kindheit in Deutschland lebend (1 Fall). Die Versuchspersonen wurden nach den Richtlinien des FZ Juelich in einem standardisierten Informationsbogen aufgeklärt, die Händigkeit mit dem Edinburgh Händigkeits Inventar überprüft (mittlerer LQ = 93, SD = 10, nach (Oldfield 1971).

2.2 Versuchsaufbau und Procedere

Nach einem im Ablauf identischen Trainingsexperiment a 30 Triaden, erfolgte das eigentliche Experiment im Kernspintomographen, das aus 4 Durchgängen a 30 Triaden bestand. Sowohl die Verteilung der einzelnen Triaden auf die Durchgänge, als auch die Reihenfolge der Durchgänge wurden randomisiert. Die Zuteilung der Triaden zu den einzelnen Durchgängen erfolgte in der Abfolge einer Rangliste in der die Triaden nach ihrer durchschnittlichen Beantwortung in den Vorversuchen geordnet waren, so dass in jedem Durchgang alle Bedingungen ungefähr gleich häufig vorkamen. Im Rahmen des Trainingsdurchlaufs wurden die Probanden zunächst mittels eines standardisierten Aufklärungsbogens schriftlich und mündlich instruiert und konnten so lange üben, bis sie das Versuchsprocedere problemlos beherrschten. Der Ablauf war wie folgt: Nach einer kurzen Wiederholung der Versuchsanleitung (10 s) begann der eigentliche Versuch. Die Worttriaden wurden mit einem Digitalprojektor auf eine vor der Kopfspule montierte Mattscheibe projiziert. Die Projektion der Triaden dauerte jeweils 1500 ms, danach wurden die Probanden aufgefordert, spontan und so schnell wie möglich anzugeben, ob die Worte kohärent waren oder nicht. Die Antwort erfolgte per Tastendruck mit der rechten Hand und wurde über einen optischen Schalter registriert (Lumitech®, Taste 1 (Zeigefinger) = kohärent, Taste 2 (Mittelfinger) = inkohärent, Taste 3 (Ringfinger) = Kontrolltriade). Unmittelbar nach Erlöschen der Triade erschien ein Fragezeichen, das an die Angabe des

Lösungswortes erinnern sollte und für das Antwortfenster von 2s sichtbar blieb. Um zu kontrollieren, ob der Proband wirklich keine Vorstellung vom möglichen Lösungswort hatte und für das Sprechen an sich zu kontrollieren, musste in jedem Fall ein Lösungswort genannt werden, auch wenn eine Triade zuvor als inkohärent beurteilt wurde. Im Zweifelsfall sollte der Proband „weiß nicht“ antworten. Die akustische Aufzeichnung der Antworten während der EPI-Scans erfolgte mit einem eigens angefertigten, nichtmagnetischen Elektret-Mikrophon, das direkt am Kopf des Probanden befestigt wurde und über einen Lichtleiter und eine spezielle Grafikkarte mit einem Verstärker im Versuchsraum verbunden war. Danach erfolgte eine Pause von 2000 bis 8000 ms Dauer, die unabhängig von den Triaden randomisiert wurde, um in der ereigniskorrelierten Datenauswertung verschiedene Punkte der BOLD-Antwort abzugreifen. Der Versuchsablauf wurde über das Stimuluspräsentationsprogramm Presentation® (Version 0.51) gesteuert, das auch die Triggerung des Kernspintomographen und die Registrierung der Antworten übernahm. Durch eine ereigniskorrelierte Auswertung der Aktivität konnten eventuelle durch das Sprechen induzierte Bewegungsartefakte von der zeitverzögerten hämodynamischen Antwortfunktion unterschieden werden (Birn, Bandettini et al. 1998; Birn, Bandettini et al. 1999; Palmer, Rosen et al. 2001; Huang, Carr et al. 2002). In der nachfolgenden Graphik wird der Versuchsaufbau noch einmal darstellend zusammen gefasst (Abb. 3).

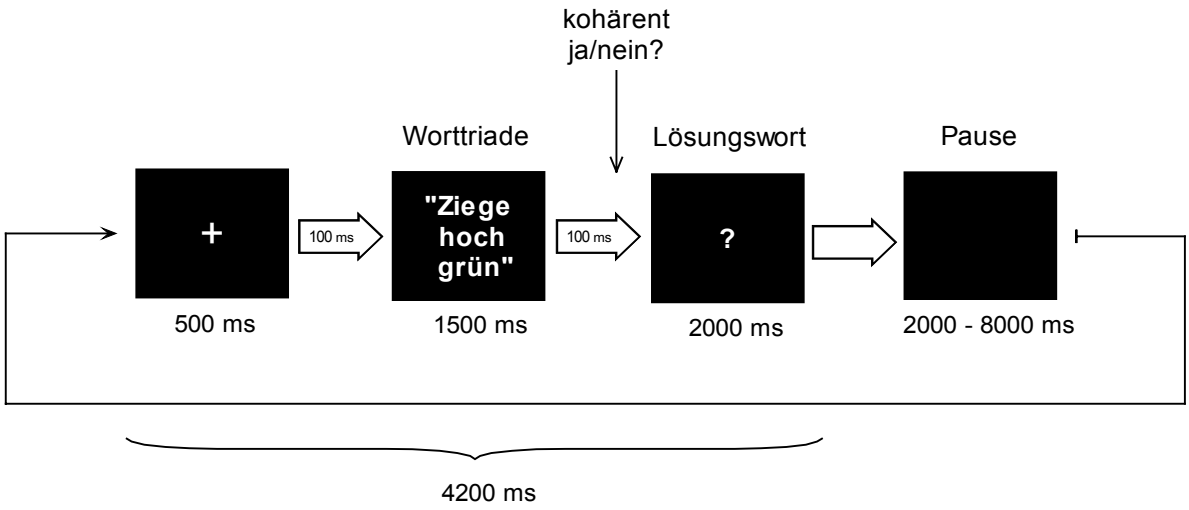


Abb. 3: Versuchsaufbau

2.3 Wortmaterial

Das verwendete Wortmaterial stammte in seiner Rohfassung aus den Versuchen von Bolte und Goschke, die 72 Worttriaden aus den Untersuchungen von Bowers et al. ins Deutsche übersetzt hatten. Bowers et al. wiederum hatten das Material ursprünglich aus dem "Remote Associates Task" von Mednick & Mednick (Mednick and Mednick 1967) und Arthur's Bearbeitung des "Kent Rosanoff Word Association Test" (Kent and Rosanoff 1910) übernommen. In einem Probelauf wurden die 72 Triaden im geschilderten Versuch getestet. Während in der Untersuchung von Bolte bei einer Präsentationszeit und Antwortzeit der Triaden von jeweils 4 s 20% der Triaden explizit gelöst und von den verbleibenden nicht gelösten wiederum 70% implizit als kohärent beurteilt worden waren, wurden in einer ersten explorativen Wiederholung des Experiments mit 13 Medizinstudenten und einer Präsentationszeit von 2 s (Antwortzeit 4 s) 36% der Triaden gelöst, von den verbleibenden nichtgelösten Triaden jedoch nur 30 % als kohärent erkannt. Insgesamt wurden 54 % aller "kohärenten" Triaden als solche erkannt, davon 64% explizit (nach engen Kriterien, d.h. das a priori definierte Lösungswort wurde exakt genannt), konservativ geschätzt 84 % (hier wurden alle Antworten als explizit gewertet).

Um für die funktionelle kernspintomographische Untersuchung ein ungefähr ausgeglichenes Verhältnis von individuell impliziten und expliziten Antworten zu erreichen, wurden die einzelnen Triaden noch einmal inhaltlich überprüft, nach ihrer durchschnittlichen Beantwortung sortiert und dementsprechend modifiziert.
Aus Gründen der semantischen Eindeutigkeit wurden unabhängig von ihrer Beantwortung zunächst alle Triaden mit polysemen Lösungsworten aussortiert, d.h. solche von denen sich zwar jedes Wort auf das Lösungswort bezog, jedoch in einer unterschiedlichen semantischen Bedeutung, z.B. "Ball" im Sinne von "Tanzball" oder "Schneeball" (3 Triaden). Ebenso herausgenommen wurden jene Triaden, bei denen eines oder mehrere Worte lediglich als Wortteil oder Wortstamm mit dem Lösungswort verwandt war, jedoch nicht inhaltlich, wie z. B. "Kopf" mit "Schmerz, Jäger, Kohl" (6 Triaden). Eine kohärente Triade wurde als semantisch unzureichend eingestuft ("Vogel, Seiten, Butter" für "gelb"), 3 Triaden in einem Wort verändert, eine modifiziert und als inkohärent übernommen. Dazu wurden alle objektiv kohärenten Triaden, die überwiegend als nicht kohärent bewertet wurden (11) sowie alle objektiv inkohärenten, die zu einem großen Teil als kohärent erkannt wurden, als kohärent gezählt, z.B. "groß, Haar, Schotte" als "Highlander" oder

"Sean Connery“ (2), bzw. modifiziert und als kohärent übernommen (1). Darüber hinaus wurden einige inkohärente Triaden mit starken emotionalen oder assoziativen Konnotationen wie z.B. "Liebe, Boden, Schmerz", oder "Traum, Ball, Buch" gestrichen (4) oder verändert (6). Auf diese Weise blieben 30 inkohärente Triaden übrig, die im überwiegenden Teil der Fälle auch so beantwortet wurden. Um insgesamt wieder ein ausgeglichenes Verhältnis von "inkohärenten", "impliziten kohärenten" und "expliziten kohärenten" Antworten zu erhalten, wurden zu den verbleibenden 27 "kohärenten" Triaden noch einmal 23 zusätzliche entworfen, so dass nun insgesamt 50 kohärente und 30 inkohärente Triaden zur Verfügung standen. Da auf Grund des ersten Vorversuches geschätzt werden konnte, dass ungefähr 3/5 der kohärenten Triaden erkannt werden (davon wiederum 1/2 explizit), konnte so ein in etwa ausgeglichenes Verhältnis aller drei Antwortbedingungen erwartet werden.

Nachdem die Untersuchungen von Bolte gezeigt hatten, dass die implizite Kohärenzbeurteilung bis zu einer Präsentationszeit von 1,5 s funktioniert, wurde die Präsentationszeit um 400 ms auf 1500 ms verringert, um den impliziten Anteil der Antworten weiter zu erhöhen. Eine weitere Verringerung erschien unter den erschwerten Bedingungen im Kernspintomographen unrealistisch. Um nicht die retrograde Begründung der spontan gegebenen Antwort zu erfassen, sondern zu überprüfen, ob zum Zeitpunkt des Kohärenzurteils eine explizite Begründung vorlag oder nicht, wurde zudem die Antwortzeit auf 2 s verkürzt. Dabei wurden die Probanden angehalten, ihr Kohärenzurteil sofort nach Ausblenden der Triade abzugeben und direkt daran anschliessend ihr Lösungswort zu nennen. Um Unsicherheiten in der Wertung zu vermeiden, sollte dabei jede Lösung angegeben werden, selbst wenn sie dem Probanden spontan unsinnig erschien.

Das so modifizierte Material wurde noch einmal an weiteren 20 Probanden getestet. Von allen Triaden (unabhängig von ihrer "gedachten" Bestimmung) wurden nun 897 als kohärent bewertet (44%), davon wiederum 56% mit einer expliziten Begründung und 44% implizit, so dass mit dem modifizierten Material ein ungefähr ausgeglichenes Verhältnis von kohärenten und inkohärenten Urteilen, sowie impliziten und expliziten Kohärenzurteilen für den Kernspinversuch erwartet werden konnte.
Diesen insgesamt 80 „Zieltriaden“ wurden zudem 40 Kontrolltriaden aus „Pseudowörtern“ gegenübergestellt, die als high-level baseline dienen sollten. Die Kontrolltriaden wurden

mit einem Java-basierten Passwortgenerator generiert, der gut lesbare, aber sinnlose Phantasiewörter generiert, die entsprechend den Zieltriaden nach Groß- und Kleinschreibung, sowie Buchstabenhäufigkeit (5,375 Buchstaben/Wort) balanciert wurden. In einem Trainingsversuch wurden die Probanden instruiert, dass Sie neben den eigentlichen Triaden sog. Kontrolltriaden aus Pseudowörtern entdecken sollten. In diesem Fall sollten sie die Taste 3 drücken und „Test“ antworten. Auf diese Weise konnten die gleichbleibenden Versuchsbedingungen (Lesen, Tastendruck, Sprechen) kontrolliert und die Verarbeitung von semantisch gehaltvoller bzw. nicht gehaltvoller Information verglichen werden. Eine vollständige Auflistung der letztlich verwendeten Triaden findet sich in Anhang (Tab II).

2.4 Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

Physikalische Grundlagen: Die Messung von Protonenspins

Die technische Entwicklung der Magnetresonanztomographie, wie sie seit den 80er Jahren in der medizinischen Diagnostik und Forschung eingesetzt wird, geht auf das Jahr 1944 zurück, in dem der russische Physiker Zavoisky zum ersten Mal das Phänomen der sog. Elektronen-Spin-Resonanz (ESR) beschrieb. Die ESR besagt, dass sich das magnetische Dipolelement von Molekülen auf den Bahndrehimpuls der Elektronen zurückführen lässt, die sich durch elektromagnetische Felder anregen lassen und diese Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder abgeben können (Zavoisky 1944). Das gleiche Phänomen wurde 1946 unabhängig voneinander von den Physikern Felix Bloch und Edward Purcell in Bezug auf Protonen nachgewiesen und als Kernspin-Resonanz bezeichnet (Bloch 1946; Bloch, Hansen et al. 1946; Purcell, Torrey et al. 1946). Theoretisch verfügen alle Atome mit ungeraden Kernladungszahlen wie Wasserstoff, Kohlenstoff, Fluor, Natrium oder Phosphor über einen als Kernspin bezeichneten Eigendrehimpuls, der gemessen werden kann. Da der Körper zum überwiegenden Teil aus Wasser besteht (ca. 60-80%) und die zu letzt genannten Elemente nur in geringen Mengen vorkommen, eignet sich die Messung von Wasserstoff besonders zur Untersuchung lebender Gewebe. Die Rotation der Wasserstoffprotonen resultiert in einem magnetischen Dipolmoment, welches sich in neutraler Umgebung aufhebt, da die Protonen zufällig verteilt in allen möglichen Raumrichtungen schwingen. Legt man jedoch ein starkes

externes Magnetfeld an, richten sich die Protonen gemäß ihrer Dipoleigenschaft parallel und antiparallel entlang der Feldlinien des äußeren Magnetfeldes aus. Dabei stellt die parallele Ausrichtung den energetisch günstigeren Zustand dar, wodurch es zu einem leichten Überschuss an parallel ausgerichteten Protonen kommt, der in einem magnetischen Summenvektor resultiert, welcher letztlich das Substrat der elektromagnetischen Messungen bildet. Die Präzessionsfrequenz mit der die Protonen auf einer kegelförmigen Bahn um ihre eigene Achse rotieren korreliert mit der Stärke des angelegten Magnetfeldes und wird durch die Larmor-Gleichung beschrieben.

Larmor-Gleichung: $\omega = 2\pi\gamma B_o$

ω = Larmor Frequenz

γ = Gyromagnetische Konstante (42,577 MHz/T für H^1)

B_o = Magnetische Feldstärke

Dabei definiert die Larmor-Frequenz nicht nur den Zusammenhang des Magnetfeldes mit dem Anregungszustand der Protonen, sondern auch diejenige Energie, die notwendig ist, um die präzedierenden Protonen auf das höhere Energieniveau zu bringen, d.h. antiparallel auszurichten, bzw. umgekehrt die Energie der Photonen die ausgesandt werden, wenn ein Proton wieder auf das niedrigere Niveau zurückschwingt.

$$E = h \nu \text{ oder } E = h \gamma B_o$$

(Plancksches Wirkungsquantum h = 6.626×10^{-34} J s)

Diesen Zusammenhang macht man sich zu Nutze, um die räumliche Quelle des empfangenen elektromagnetischen Signals zu rekonstruieren. Indem verschiedene magnetische Gradienten durch ein entsprechendes Gewebe gelegt werden, schwingen die Protonen der einzelnen Schichten in unterschiedlichen Frequenzen, so dass sich das empfangene Signal einer Schicht zuordnen lässt. Die eigentliche Messung funktioniert also folgendermaßen: nachdem sich die Protonen längs des äußeren Magnetfeldes ausgerichtet haben, wird ein kurzer Hochfrequenzimpuls der entsprechenden Resonanzfrequenz eingestrahlt, welcher die Protonen um einen bestimmten Winkel (in der Regel 90°) kippt und synchronisiert, so dass alle Protonen in Phase kreisen und so einen rotierenden magnetischen Dipol erzeugen. Dadurch kommt es zu einer Abnahme der Longitudinal-

Magnetisierung und Zunahme der Quermagnetisierung. Nach Abschalten kehren die aus dem Gleichgewicht gebrachten Protonen auf ihr ursprüngliches „paralleles“ Aktivierungsniveau zurück, was in einer Wiederzunahme des longitudinalen Vektors resultiert.

Diese Wiederzunahme des längsgerichteten Summenvektors wird als **longitudinale Relaxation** bezeichnet und folgt einer exponentiellen Kurve mit der gewebeabhängigen Zeitkonstante T1. Während die longitudinale Relaxation auf der Wechelwirkung zwischen den Protonen und der empfangenden Spule beruht und daher auch Spin-Gitter-Relaxation genannt wird, resultiert die Interaktion zwischen den Protonen in einer Dephasierung der Protonen und damit einer Abnahme der transversalen Magnetisierung. Dieser Effekt wird daher als **Transversale Relaxation**, oder Spin-Spin-Relaxation bezeichnet und durch die Zeitkonstante T2 definiert. Das bei der Rückkehr auf das Ursprungsniveau ausgesandte Signal, der sog. “Free Induction Decay“ (FID) wird von der Empfangsspule aufgezeichnet. Der zeitliche Verlauf des Signals wird mit einer zweidimensionalen Fourier-Transformation in eine Frequenzfunktion umgewandelt und als Bildpunkt dargestellt (Kumar, Welti et al. 1975).

Durch dreidimensionale Magnetfeldgradienten werden einzelnen Raumpunkten verschiedene Resonanzfrequenzen zugeordnet, die so selektiv angeregt und schichtweise ausgelesen werden. Während bei normalen anatomischen Sequenzen pro Impuls lediglich eine definierte zweidimensionale Schicht gemessen wird, kommt in der Echoplanaren Bildgebung (EPI) ein zusätzlicher Auslesegradient zur Anwendung, über den mit einem Anregungsimpuls alle Schichten ausgelesen werden. Die EPI-Technik wurde 1977 von Mansfield eingeführt und ermöglicht es, ein ganzes Gehirn in einer TR (time to repeat) von 2 bis 3 Sekunden aufzuzeichnen (Mansfield 1977). EPI-Sequenzen können sowohl als Spin-Echo (SE), als auch Grandienten-Echo (GRE) Sequenz aufgenommen werden. In einer Spin-Echo-Pulssequenz wird zunächst ein Anregungsimpuls appliziert (RF), der die Protonenspins wie beschrieben um 90° kippt. Nach einer gewissen Zeit, die als halbe Echozeit bezeichnet wird (TE/2, für time to echo) wird ein 180° Impuls (Inversionsimpuls) eingestrahlt, der die Richtung der transversal präzedierenden Protonen um 180° umkehrt und teilweise rephasiert (s. Abb. 4).

Je nach Repetitionszeit (TR) und Echozeit (TE) werden so die Effekte unterschiedlicher T1 oder T2-Werte verstärkt und auf diese Weise T1 (sensitiv für longitudinale Relaxation) bzw. T2 (sensitiv für transversale Relaxation) gewichtete MR-Sequenzen aufgenommen.

Um möglichst rein **T1-gewichtete** Bilder zu erhalten, wird die Echozeit (TE) vergleichsweise kurz eingestellt. In dieser Zeit können langsam relaxierende Spins nicht wieder in ihre Ausgangslage zurückkehren und erzeugen so ein geringes Resonanzsignal. Flüssigkeiten, wie z.B. Liquor, haben eine lange T1, erzeugen daher nach einer kurzen TE kaum ein Signal und erscheinen daher in T1-gewichteten Sequenzen dunkel. Gewebe mit kurzer T1, wie z.B. Fett, relaxieren schnell und zeigen bereits nach einer kurzen TE ein deutliches Signal, das hell zur Darstellung kommt. Dahingegen verstärken **T2-gewichtete** Sequenzen mit einer langen TE und TR T2-betonte Signalunterschiede, so dass sich hier homogene Gewebe wie Flüssigkeiten, die eine lange T2 und damit eine geringe Abnahme der Transversalmagnetisierung aufweisen, hell kontrastiert abzeichnen, während die Protonen von Gewebe mit kurzer T2 bereits dephasiert sind somit keinen transversalen Vektor ergeben.

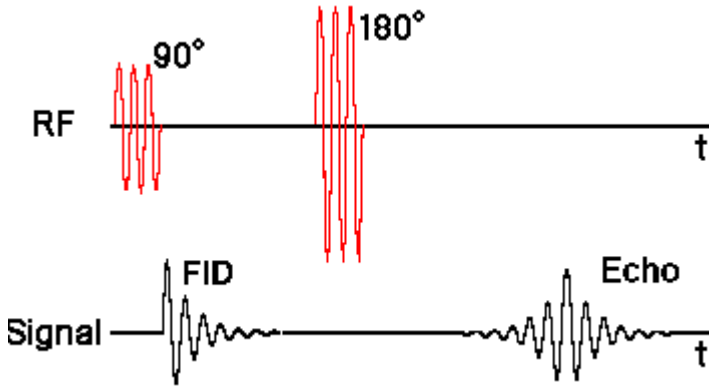


Abb. 4: Beispiel einer Spin-Echo Sequenz

Während die Konstante T1 primär von den molekularen Eigenschaften des entsprechenden Moleküls und seiner Abstrahlungscharakteristik abhängt, wird die Abnahme der Quermagnetisierung in erster Linie durch die Wechselwirkungen zwischen den Protonen des Gewebes beeinflusst. Auf Grund der Tatsache, das nicht alle Protonen in Phase schwingen und leicht unterschiedliche Larmor-Frequenzen aufweisen, kommt es zu einer wechselseitigen Interaktion, die zu einem zunehmenden Verlust der Phasenkohärenz führen. Durch Inhomogenitäten innerhalb eines Gewebes kommt es so zu Unregelmäßigkeiten innerhalb des Magnetfeldes, die in einer rasch abnehmenden Transversalmagnetisierung resultieren. Diese Effekte werden mit der Konstante T2* beschrieben. **T2*-gewichtete** EPI Sequenzen, wie sie in der funktionellen Bildgebung zur

Anwendung kommen, verfügen über eine lange Echozeit und sind somit besonders sensitiv für lokale Suszeptibilitätsunterschiede, wie sie in der Umgebung von deoxygeniertem Hämoglobin vorkommen (Hornak, Rolls et al. 1996; Toga and Mazziotta 1996).
Nachdem Raymond Damadian bereits 1971 festgestellt hatte, dass sich die Relaxationszeiten von gesundem und Tumorgewebe unterscheiden, gelang es Lauterbur 1973 ein Wassergefäß bildlich darzustellen, bevor er kurze Zeit später zum ersten Mal ein lebendes Objekt, eine kleine Muschel, untersuchte (Damadian 1971; Lauterbur 1973). Nach der Einführung der Fourier-Funktion zur Datenakquisition durch Richard Ernst 1975, veröffentlichten zwei Jahre später Damadian und Mansfield die ersten Untersuchungen am lebenden Menschen. Im gleichen Jahr gelang Mansfield die anatomische Darstellung eines Fingers, wenig später die erste Aufnahme eines menschlichen Abdomen (Damadian 1977; Damadian, Goldsmith et al. 1977; Mansfield and Maudsley 1977; Mansfield, Pykett et al. 1978).

Physiologische Basis der fMRT: der BOLD-Effekt

Die Tatsache, dass Blut magnetische Eigenschaften besitzt, war bereits Faraday bekannt (1845) und wurde von Linus Pauling näher untersucht, der erstmals die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von oxygeniertem und deoxygeniertem Hämoglobin (Hb) beschrieb (Pauling and Coryell 1936) und so bereits 1936 die physikalische Erklärung der später beobachteten blutsauerstoffabhängigen Intensitätsschwankungen lieferte, die letztlich am Ende des 20. Jahrhunderts zur Entwicklung der funktionellen Kernspintomographie führten.
1990 stellten Ogawa et al. in Tierexperimenten fest, dass eine Abnahme der Sauerstoffsättigung und die daraus resultierende Zunahme an deoxygeniertem Hämoglobin zu einer signifikanten Kontrastabnahme der Blutgefäße und Suszeptibilitätszunahme des umliegenden Gewebes führt (Ogawa, Lee et al. 1990). Diese Beobachtung bildete den Ausgangspunkt der Experimente von Kwong et al., die schließlich 1992 nachweisen konnten, dass dieser Effekt ausreicht, um durch neuronale Aktivität bedingte Veränderungen im cerebralen Blutfluss zu erfassen. Damit war die Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie begründet, mit der durch regionale Durchblutungsänderungen hervorgerufene Suszepitbilitätsunterschiede gemessen und so Rückschlüsse auf die lokale neuronale Aktivität ermöglicht werden.

Die physiologische Basis des beobachteten Effekts wird noch nicht genau verstanden. Offensichtlich führt die ATP-intensive neuronale Aktivität, über die sauerstoffverbrauchende Umwandlung von ADP zu ATP zu einem kurzzeitigen Anstieg des deoxygenierten Hämoglobins, der sich in dem initialen „Dip“ der BOLD-Response wiederspiegelt. Nach kurzer Zeit führt das freigesetzte ADP jedoch zu einer reaktiven Erweiterung der kapillären Gefäße im entsprechenden Endstrombereich und damit zu einer Steigerung des regionalen Blutflusses um bis zu 30%. Diese Mehrdurchblutung geht offensichtlich weit über den eigentlichen Sauerstoffbedarf hinaus und resultiert in einer relativen Zunahme an oxygeniertem Hämoglobin. Während das Deoxyhämoglobin paramagnetisch ist und auf Grund seiner kurzen T2 zu einer raschen Abnahme der Transversalmagnetisierung führt, weist das diamagnetische Oxyhämoglobin eine geringe magnetische Suszeptibilität auf und führt mit seiner relativ langen T2 zu einer aktivitätsabhängigen Intensitätszunahme, die als BOLD (Blood oxygen dependent) Effekt beschrieben wird (Fox and Raichle 1986; Villringer and Dirnagl 1995; Hyder, Rothman et al. 1997; Vanzetta and Grinvald 1999).

Die hohe statistische Korrelation von BOLD-Effekt und neuronaler Aktivität hat sich in zahlreichen Studien bestätigt, die neurophysiologische Grundlage des Effekts ist jedoch noch nicht hinreichend geklärt. Auf Grund einer linearen Korrelation der Amplitude somatosensorischer evozierter Potentiale und der Intensität der BOLD-Response wird vermutet, dass das BOLD-Signal mit synchronisierter synaptischer Aktivität korreliert (Arthurs, Williams et al. 2000). Die tierexperimentellen Studien von Logothetis, der erste simultane Messungen mit funktioneller MRT und elektrischen Einzelzellableitungen durchgeführt hat, zeigen eine Korrelation des BOLD-Signals mit lokalen Feldpotentialen (LFP), welche als Ausdruck synaptischer Aktivität interpretiert werden, und weisen somit auf eine Kopplung des BOLD-Effekts mit der dendritischen Input-Verarbeitung hin. Während die eigentliche neuronale Aktivität aerob verläuft und zu einem initial gesteigerten Sauerstoffverbrauch führt, beruht der synaptische Transmitterstoffwechsel im wesentlichen auf anaerober Glykolyse, was den nachfolgenden Sauerstoffüberschuss erklären könnte (Logothetis, Pauls et al. 2001; Raichle 2001). Die physiologische Plausibilität dieser Annahme wird von MR-Spektroskopischen Studien gestützt, die zeigen, dass das metabolische Recycling des von exzitatorischen Neuronen ausgeschütteten Glutamat zu Glutamin 80-90% des kortikalen Glukoseverbrauchs ausmacht (Pan, Stein et

al. 2000). Neuere Berechnungen stellen diese Annahme jedoch in Frage und vermuten, dass die BOLD-Response letztlich gar nicht an den Energieverbrauch gekoppelt sein könnte, sondern direkt mit Glutamat-vermittelten signalverarbeitenden Prozessen zusammenhängt, unabhängig davon, ob diese einen Mehrverbrauch an Energie verursachen oder in einer vermehrten neuronalen Aktivität resultieren (Attwell and Iadecola 2002).

2.5 Experimentelle Einstellungen

Bildregistrierung

Die funktionellen magnetresonanztomographischen Messungen (**fMRT**) wurden in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Kernspintomographie und kognitive Neurologie am Institut für Medizin des Forschungszentrum Jülich durchgeführt und erfolgten mit einem 1,5 T Magnetresonanztomographen der Firma Siemens (Magnetom Vision). Die funktionellen Messungen erfolgten mit echoplanarer Bildgebung (EPI) in folgenden Einstellungen: time to repeat (TR) = 3000 ms, time to echo (TE) = 66 ms, field-of-view = 200 x 200 mm^2, flip angle 90°, matrix size = 64 x 64, voxel size = 3,125 x 3,1 x 4,4 mm^3. Dabei wurde das Gehirn in Intervallen von 3 s gescannt, in 30 axialen Schichten mit einem Schichtabstand (inter-slice gap) von 0,4 mm, die das ganze Gehirn umfassten. Lediglich die untersten Kleinhirnanteile konnten bei einigen Probanden nicht ganz erfasst werden. Neben der funktionellen EPI-Messung wurde zudem von jedem Proband eine hochauflösende anatomische Messung erhoben, mit einer stark T1-gewichteten 3D-Gradienten-Echo Sequenz (MP-RAGE, magnetization-prepared rapid acquisition gradient echo) aus 128 Schichten a 1,33 mm und einer TR von 11,4 ms, TE von 4,4 ms, einem flip angle von 15°, FOV von 256 x 256 mm^2 und einer matrix size von 200 x 256.

Aufzeichnung der Antworten

Die akustische Aufzeichnung der Antworten während der fortlaufenden EPI-Scans erfolgte mit einem eigens angefertigten, nichtmagnetischen Mikrophon, das an der Spule befestigt wurde und über einen nichtmagnetischen Leiter mit einer Soundkarte im Versuchsraum verbunden war. Das Mikrophon bestand aus zwei um 180° gekippten Elektret-Mikrophonen der Firma EMKAY© (Type MD6052USZ-1), die mit einer eigens angefertigten Platine so verschaltet wurden, dass alle von beiden Seiten kommenden

Geräusche, wie das Scannergeräusch, reduziert wurden, während unidirektionale Signale, in diesem Fall die sprachlichen Äußerungen der Versuchspersonen, ungedämpft übertragen wurden. Das Mikrophon wurde direkt vor dem Mund des Probanden fixiert und zudem mit einen Schaumstofftrichter gegen die Scanner-Geräusche abgeschirmt. Die Antworten wurden über Kopfhörer verfolgt und in einem Antwortbogen eingetragen. Um eventuelle „Missverständnisse“ aufzudecken, wurden die Antworten zudem auf Minidisc® aufgezeichnet und später noch einmal unabhängig kontrolliert.

2.6 Auswertung

Räumliches Preprocessing

Nach der Messung im Tomographen wurden die Kernspindaten zunächst auf eine Sun Workstation übertragen und vom “IMA“ in das “Analyze“-Format konvertiert.
Um falschpositive Aktivierung durch strukturelle Differenzen oder Bewegungen zu reduzieren und die individuellen Daten für einen statistischen Vergleich zu normieren, wurden zunächst einige räumliche Korrekturschritte durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die Augen maskiert, um die Genauigkeit des Realignment zu erhöhen, bzw. Artefakte durch periodische Durchblutungsänderungen der Augen zu vermeiden. Dabei wurden zunächst alle Bilder anhand der 3D-Sequenz reorientiert, d.h. auf die Commissura anterior zentriert und horizontal entlang einer gedachten Verbindungslinie zwischen vorderer und hinterer Commissur ausgerichtet. Mit einem eigens programmierten Skript wurden dann alle Voxel im Bereich der Augen genullt (Klaas Enno Stephan, FZ Jülich). Auf Grund bekannter T1- Equilibrationseffekte am Beginn der Messungen wurden jeweils die ersten 3 Scans der einzelnen Durchgänge verworfen.
Um bewegungsbedingte räumliche Translationen der einzelnen Scans zu korrigieren, wurden alle EPI-Bilder der 4 runs coregistriert und mit der sog. “sinc interpolation“ auf einen Referenzscan (1. Scan der Serie) rücktransformiert. Die hierbei gewonnen Realignmentparameter (Translation und Rotation) wurden gespeichert und später als normalisierter Koregressor in die Designmatrix aufgenommen, um für bewegungsbedingte Varianz zu kontrollieren. Dank der ausführlichen Instruktion und optimalen Lagerung der Probanden wurde das vor Beginn der Studie festgelegte Ausschlusskriterium einer longitudinalen Abweichung von mehr als 4 mm, d.h. einer Schicht, bzw. einer Rotation von

mehr als 3° in keinem Fall überschritten, so dass kein Proband ausgeschlossen wurde (Realignmentparameter: Mittelwert Translation = ±1,52 mm, SD = 0,8 mm, Range = 0,1 – 3,9 mm; Mittelwert Rotation = ±0,99°, SD = 0,68°, Range = 0,3-2,4°).
Da die einzelnen Schichten eines Scans zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden, wurde in der nachfolgenden Slice Time Correction der genaue Aufnahmezeitpunkt der einzelnen Schichten korrigiert, um später eine exakte Zuordnung der einzelnen Ereignisse zu ermöglichen. Um für interindividuelle Unterschiede in der Morphologie zu korrigieren, wurden nun alle Bilder normalisiert, d.h. in den in SPM implementierten standardisierten Raum von Talairach und Tournoux übertragen (Talairach and Tournoux 1993). Auf Grund der höheren Auflösung und der Gefahr, die Transformationsroutine durch Susceptilitätsartefakte der EPI-Bilder zu verzerren, wurde die Normalisierungs-vorschrift anhand der zuvor koregistrierten T1-Bilder gewonnen, und dann auf die reorientierten und transformierten EPI-Bilder angewandt. Basierend auf statistischen Simulationen, die gezeigt haben, dass sich durch eine Mittelung benachbarter Werte zufällige Werte minimieren, jedoch systematische räumlich ausgedehnte Artefakte, wie im Falle des BOLD-Effekts, summieren, wurden die Bilder im letzten Schritt der räumlichen Vorverarbeitung mit einem “Weichzeichner“ von 10 mm „gesmoothed“.

Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der Bilddaten erfolgte mit SPM99 in einer random effects Analyse mit einem Antwort-getriggerten, Ereignis-korrelierten Design (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, Friston, Holmes et al. 1995).
Die Analyse umfasste zwei Ebenen: Zunächst wurde für jeden Probanden eine individuelle Designmatrix erstellt, welche die genauen Zeitpunkte der verschiedenen Antworten umfasste. Entsprechend der geschilderten Antwortklassifizierung wurden insgesamt 11 statistische Regressoren definiert, bestehend aus den 4 Zielbedingungen (cohex, cohim, incoh, baseline), einer Fehlerbedingung (fehlerhafte, bzw. nicht verwertbare Antworten), und den 6 normalisierten Realignmentparametern (3 Translation, 3 Rotation). Diese Ereignisse wurden mit der kanonischen hämodynamischen Antwortfunktion (hemodynamic response function HRF) konvolviert.

Nachdem die Aufgabe aus verschiedenen Teilprozessen bestand (Verarbeitung und Verstehen des Wortmaterials, Analyse der semantischen Kohärenz, Exekution der Antwort per Tastendruck, sprachliche Artikulation der expliziten Lösung) wurden zwei zeitliche Modelle analysiert:
Um die Hauptcharakteristika der Aktivierung zu erfassen, wurden die Antworten zunächst als Einheit betrachtet und als integrierte Miniblocks modelliert (in SPM „epochs“). In den Miniblocks sollte also die Aktivierung zum Ausdruck kommen, die über den gesamten Verarbeitungsprozess der Aufgabe signifikant verschieden war.
In einer zweiten, unabhängigen Analyse wurden einzelne Momente in der Bearbeitung der Aufgabe herausgegriffen und als sequentielle Abfolge singulärer Ereignisse modelliert. Dabei wurden folgende Zeitpunkte untersucht: 1) Stimulus onset (SO), 2) Mitte der Stimulus-Präsentation (SO + 750 ms), 3) Antwort Tastendruck (R), sowie 4) Zeitfenster der expliziten Antwort (Tastendruck plus 1 bzw. 2 s, RP1 und RP2). Um globale Effekte und technische Artefakte die sich über mehrere Scans erstrecken können zu minimieren, wurden die Grauwerte der einzelnen Voxel zum Mittelwert des jeweiligen Scans skaliert und mit einem high- und low-pass Filter korrigiert (Gaussian FWHM 4 s). Entsprechend der individuellen Antworten wurden folgende Kontraste modelliert:

1) task > baseline = [(cohex+cohim+incoh) > baseline]
2) coh > incoh = [(cohex+cohim) > incoh]
3) cohim > baseline
4) cohim > (cohex+incoh)
5) cohim > incoh
6) cohim > cohex
7) cohex > cohim

In einer Second-level Analyse wurde dann auf der zweiten statistischen Ebene ein T-Test über die T-Werte der individuellen Kontraste durchgeführt, um die interindividuelle Kovarianz zu erfassen. Diese sog. Random-Effects Analyse bildet die Basis der nachfolgenden Darstellungen.
Da sich die einzelnen Bedingungen auf Grund des auf die subjektiven Antworten bezogenen Designs aus einer unterschiedlichen Anzahl von Ereignissen zusammensetzen, wurden je nach Bedingung verschiedene Signifikanzniveaus erreicht. Alle dargestellten

Auswertungen beziehen sich auf p-Werte < 0.001 (unkorrigiert) und eine minimale Ausdehnung der Aktivierung von 15 Voxeln.

Alle Kontraste, bei denen aus Gründen einer besseren Differenzierbarkeit der Aktivierungsherde ein höheres statistisches Niveau gewählt wurde ($p < 0.05$, für multiple Vergleiche korrigiert), wiesen in der unkorrigierten statistischen Auswertung anatomisch das gleiche Aktivierungsmuster auf. Um die entsprechenden Bilder quantitativ vergleichen zu können, wurden alle Kontraste zunächst auf einem unkorrigierten Niveau gegenübergestellt.

Die anatomische Interpretation der resultierenden Maxima erfolgte im Vergleich mit den Referenzwerten aus dem sterotaktischen Atlas von Talairach und Tournoux (Talairach and Tournoux 1988) und der dreidimensionalen Projektion der statistischen Ergebnisse auf das hochauflösende T1-Mittelbild aller untersuchten Probanden. Die dreidimensionale Rekonstruktion der Daten erfolgte mit MRIcro (Version 1.36, Chris Rorden, University of Nottingham).

3 Ergebnisse

3.1 Verhaltensdaten

Insgesamt wurden 56 % der Triaden als inkohärent, 44 % als kohärent beurteilt (SD = 12 %). Dabei wurde in 45 % der kohärenten Urteile auch ein explizites Lösungswort genannt, während bei 55 % keine Lösung angegeben werden konnte (SD = 22 %; s. Abb 5). Die Richtigkeit der angegebenen Lösungen wurde blind von zwei unabhängigen Ratern beurteilt, wobei alle Antworten als richtig akzeptiert wurden, die entweder mit jedem der drei vorgegebenen Begriffe oder mit dem gemeinten Lösungswort inhaltlich assoziiert waren. Entsprechend der so definierten Kriterien wurden 81 % (Korrektor RI), bzw. 85 % (Korrektor SR) der Antworten als richtig eingestuft. Ein Großteil der verbleibenden Antworten ließ ebenfalls eine sinnvolle Lösungsstrategie vermuten, erfüllte jedoch nicht die formalen Kriterien im oben definierten Sinn. Der von Bolte eingeführte Diskriminationsindex, d.h. der Anteil der kohärenten Antworten, der sich auf die a priori als kohärent definierten Triaden bezog, betrug 85 % und zwar unabhängig davon, ob eine explizite Lösung angegeben werden konnte oder nicht ($p < 0{,}000$). Das heißt, obwohl keine eindeutige Lösung gegeben werden konnte, waren die impliziten Kohärenzurteile in 81 % der Fälle korrekt (Diskriminationsindex nach (Bolte 1999). Die Analyse der Antwortzeiten (Tastendruck des Kohärenzurteils ab Stimulus onset) mit einfaktorieller ANOVA ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen semantischen Urteilen (cohex, cohim, incoh: Mittelwert der individuellen Mediane = 2075 ms, SD = 524 ms). Unabhängig vom letztlich getroffenen Urteil dauerte die Bewertung der semantisch gehaltvollen Triaden (eigentliche Zieltriaden) signifikant länger als das bloße „Erkennen“ der Kontrolltriaden (baseline, Mittelwert der individuellen Mediane = 1319 ms, SD = 502 ms, $p < 0{,}000$). Deskriptiv lässt sich ferner feststellen, dass inkohärente Triaden im Mittel schneller erkannt wurde als kohärente (2033 ms zu 2096 ms) und explizite Urteile schneller gefällt wurden als implizite (2078 ms zu 2114 ms). In Tabelle 1 werden die relevanten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst.

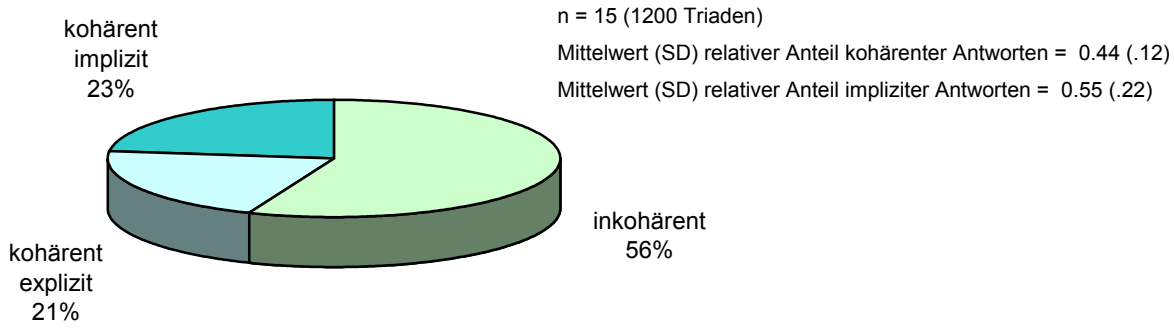


Abb. 5: Verteilung der Antworten

Tab. 1: Zusammenfassung der individuellen Verhaltensdaten

VP	Alter (Jahre)	LQ	Antworten (in Prozent)				Reaktionszeiten (ms)			
			kohärent	inkohärent	explizit	implizit	cohex	cohim	incoh	baseline
1	24	100	0,53	0,47	0,60	0,40	1961	2405	2058	1074
2	21	100	0,37	0,63	0,64	0,36	2207	1705	2093	1941
3	29	100	0,52	0,48	0,53	0,47	1749	1714	1630	1270
4	21	100	0,40	0,60	0,80	0,20	2133	2077	2236	1939
5	24	74	0,48	0,52	0,48	0,52	2372	2552	2412	1120
6	43	100	0,58	0,42	0,72	0,28	1716	1734	2401	1649
7	23	100	0,38	0,63	0,13	0,87	1985	1712	1714	721
8	22	100	0,42	0,58	0,33	0,67	2347	2397	2270	2001
9	29	100	0,62	0,38	0,58	0,42	2493	2967	2215	1906
10	21	80	0,46	0,54	0,36	0,64	2820	2973	2845	1803
11	22	100	0,30	0,70	0,33	0,67	2319	2383	2191	926
12	21	76	0,30	0,70	0,13	0,87	1163	1210	1219	613
13	21	92	0,19	0,81	0,07	0,93	1472	1699	1493	938
14	27	100	0,47	0,53	0,59	0,41	3008	2868	2480	1136
15	25	80	0,53	0,48	0,45	0,55	1420	1308	1242	754
mean	24,87	93,47	44%	56%	45%	55%	2078	2114	2033	1319
(SD)	(5,76)	(10,27)	(12%)	(12%)	(22%)	(22%)	(516)	(582)	(474)	(502)

VP = Versuchsperson, LQ = Laterality Quotient (nach Oldfield 1971)

3.2 Funktionelle Bilddaten

Im folgenden werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung der funktionellen kernpintomographischen Daten zusammengefasst, wobei zunächst das allgemeine Aktivierungsmuster dargestellt wird, d.h. jene Kontraste, die sich auf den inhaltlichen Aspekt der Aufgabe, sprich die Beurteilung und das Erkennen von semantischer Kohärenz, beziehen, gefolgt von den eigentlichen Zielkontrasten des Experiments, in denen die implizite Bedingung, die als Operator für intuitive Enscheidungsprozesse definiert wurde, mit der expliziten Bedingung verglichen wird.

3.2.1 Beurteilung von semantischer Kohärenz

Betrachtet man die Aufgabe als Ganzes, d.h. die Beurteilung semantischer Kohärenz unabhängig vom letztlich getroffenen Urteil [(cohim+cohex+incoh)>baseline] zeigt sich im wesentlichen ein superior mediales und inferior laterales präfrontales Aktivierungsmuster, das sich aus Herden im Bereich des Gyrus frontalis inferior links und einer ausgedehnten frontomedianen Aktivierung zusammensetzt, die vom medialen Anteil des oberen Gyrus frontalis (prä-SMA) bis zum vorderen Cingulum zieht. In der differentiellen Analyse der Einzelzeitpunkte (Abb. 7) zeigt sich eine sequentielle Abfolge der beteiligten Areale. Zu Beginn der Aufgabe, d.h. zum Zeitpunkt der Stimuluspräsentation, dominierte zunächst die Aktivität im Bereich des Thalamus, bevor im weiteren Verlauf die frontale Aktivierung aus prä-SMA und den linksseitigen Sprachregionen hinzu kommt. Während die Aktivierung des Kleinhirns deutlich mit dem Zeitpunkt des Tastendrucks korreliert, kommt die Aktivierung der frontalen Sprachareale am deutlichsten im Kontrast der Antwortphase zum Ausdruck, wobei die linksseitige Aktivierung früher aufzutreten scheint und mit dem Zeitpunkt der eigentlichen Kohärenzentscheidung korreliert, während die rechtsseitigen Sprachareale erst zum Zeitpunkt der sprachlichen Antwort aktiv werden (alle Werte korrigiert für $p < 0.05$ und eine Mindestaktivierung von 15 Voxeln).

Abb. 6: Beurteilung von semantischer Kohärenz [(cohim+cohex+incoh)>baseline] (miniblock, p < 0.05 korrigiert)

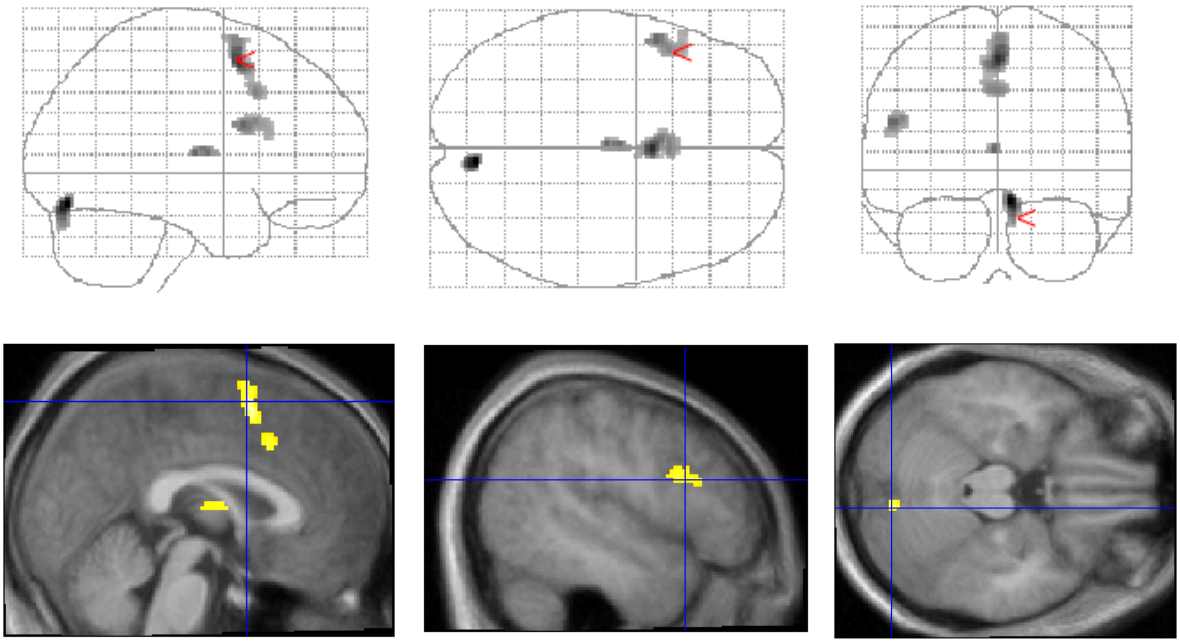
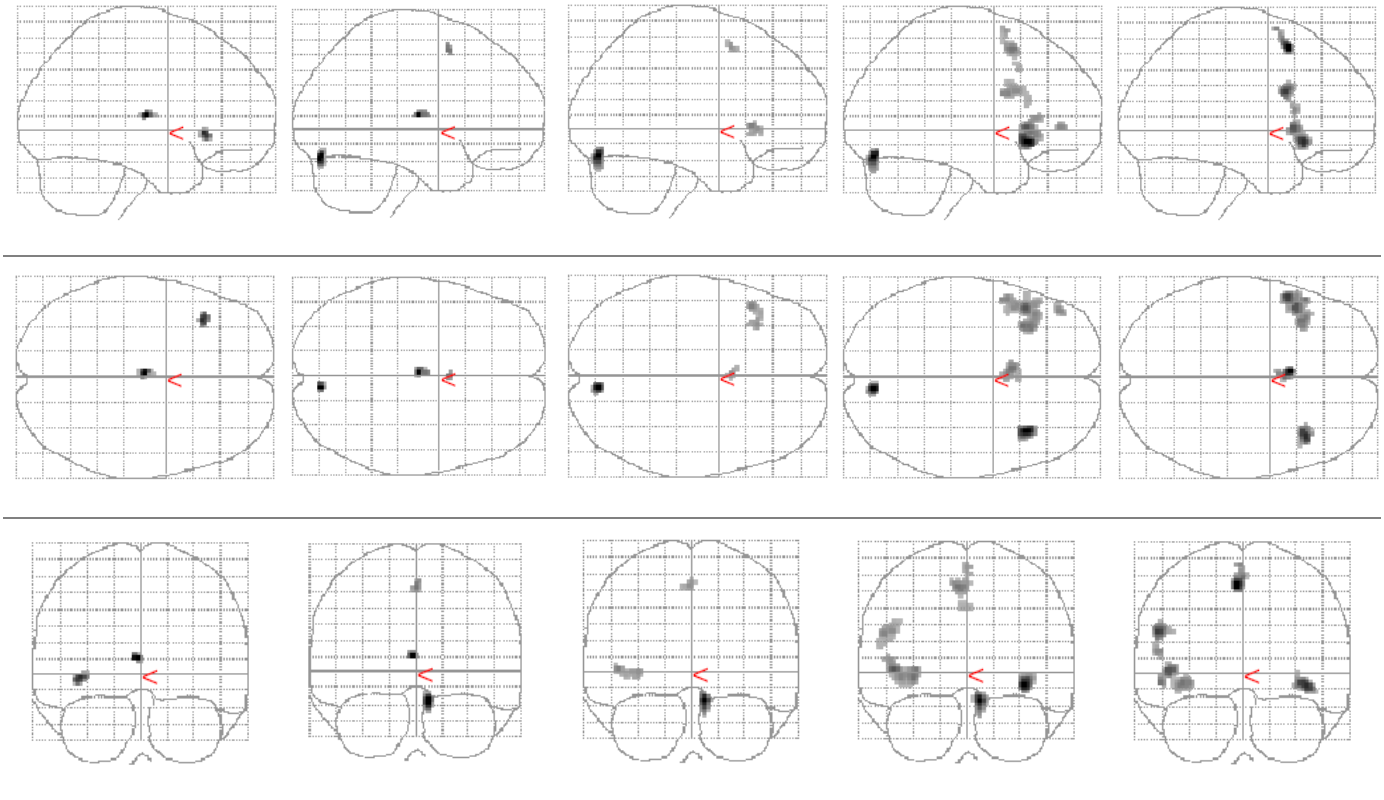


Abb. 7: Beurteilung von semantischer Kohärenz im zeitlichen Verlauf

Stimulus Onset (t = S)	Stimulus Präsentation (t = S + 750 ms)	Entscheidung (t = R)	Antwort früh (t = R + 1000 ms)	Antwort spät (t = R + 2000ms)



Z-Werte (p korrigiert < 0.05, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Thalamus (Ncl. anterior)	l > r	-2	-14	10	**5,59**	5,56				5,06
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-38	24	-2	**5,43**				5,37	
	r	36	22	-8				**6,14**	5,72	
Gyrus frontalis inferior anterior (BA 45)	l	-46	22	2			5,33	**5,70**	5,53	
Gyrus frontalis inferior orbitalis (BA 10)	l	-44	44	2				**5,36**		
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l > r	0	16	40				**5,09**		
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l > r	-4	14	56			5,23	5,50	**5,92**	5,36
Gyrus frontalis inferior / medius (BA 9)	l	-54	12	26				5,37	**5,64**	5,07
Cerebellum	r	8	-80	-18			5,59	5,98	**6,16**	5,57

SO = Stimulus onset, SP = Stimulus presentation, R = Response, RP = Response plus 1s, RP2 = Response plus 2s; MB = Miniblock

3.2.2 Erkennen von semantischer Kohärenz

Fokussiert man auf das Erkennen von Kohärenz im Vergleich zum Erkennen von Inkohärenz, d.h. alle Triaden die als kohärent erkannt wurden, unabhängig ob explizit oder implizit [(cohim+cohex)>incoh], zeigt sich ein prinzipiell ähnliches Aktivierungsmuster. Dabei steht ein Netzwerk beidseitiger sprachassoziierter frontaler Areale (li>re) im Vordergrund, sowie ein frontopolarer Herd im Bereich des Gyrus frontalis superior links, der im Kontrast der Gesamtaufgabe nicht signifikant war. Im Vergleich zur Gesamtaufgabe kommt bei der isolierten Auswertung der kohärenten Urteile deutlich die frontomediane Aktivierung, sowie die Aktivität des rechten Kleinhirns zum Ausdruck, die auch auf einem für multiple Vergleiche korrigiertem Irrtumsniveau von $p < 0.05$ persistieren (Abb. 8). In der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs sieht man zudem eine deutliche Aktivität im Bereich des Mittelhirns, die sich in Zusammenschau mit den weiteren Kontrasten auf die explizite Bedingung zurückführen lässt, wo sie sich auf die obere Vierhügelplatte projiziert, sowie eine links frontopolare und superior parietale Aktivierung, die im Gesamtkontrast nicht zum Ausdruck kamen (Abb. 9).

**Abb. 8: Erkennen von semantischer Kohärenz [(cohim+cohex) > incoh]
(miniblock, p < 0.05 korrigiert)**

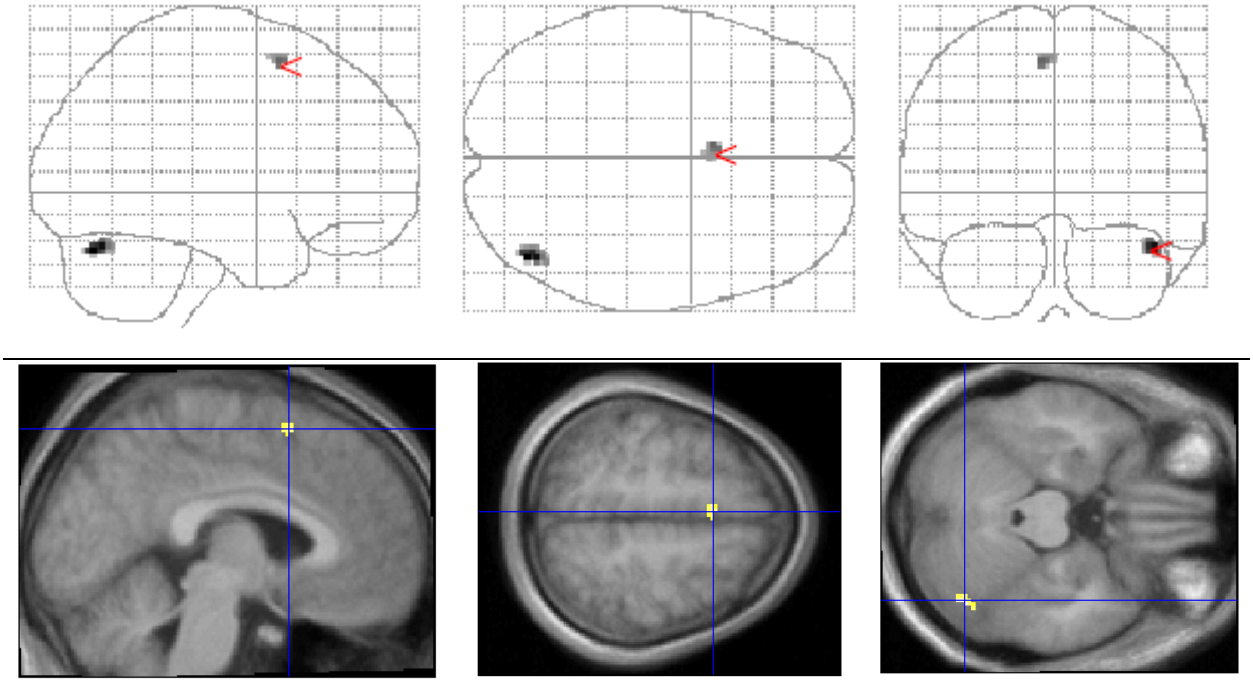
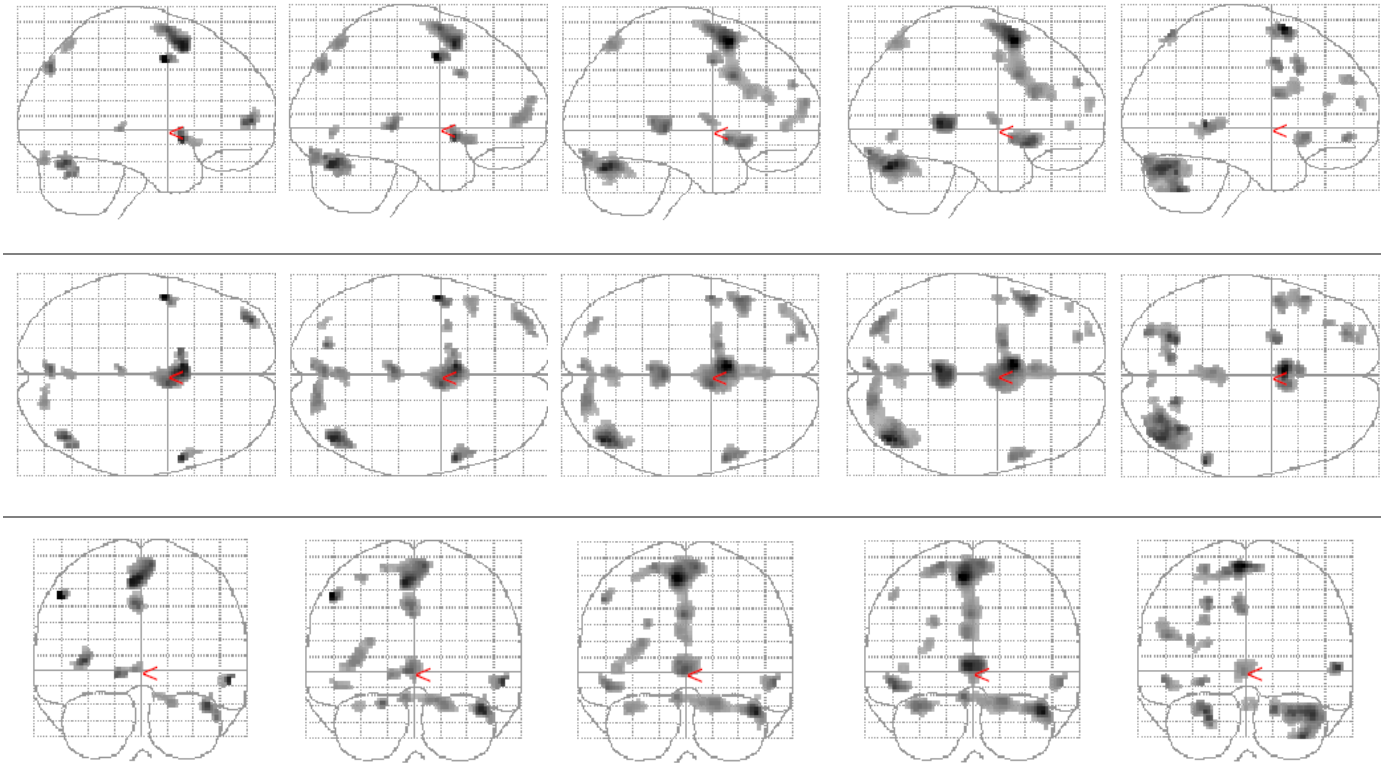


Abb. 9: Erkennen von semantischer Kohärenz [(cohim+cohex) > incoh]

Stimulus Onset (t = S)	Stimulus Präsentation (t = S + 750 ms)	Entscheidung (t = R)	Antwort früh (t = R + 1000 ms)	Antwort spät (t = R + 2000ms)



Z-Werte ($p < 0.001$ unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Gyrus frontalis medius (BA 10)	l	-36	56	6	**3,86**	3,69				3,74
Gyrus praecentralis (BA 6)	l	-52	-2	48	4,20	**4,67**				
		-26	2	64					3,84	
Gyrus temporalis superior (BA 38)	r	56	10	-6	4,00	**4,29**	4,19	4,08		4,56
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l > r	-6	10	60	4,07	4,47	5,03	**5,16**	4,81	4,60
(frontopolar, BA 9)	l	-24	54	30			3,87	3,84	3,58	
Cerebellum (Lobus posterior)	l	-26	-68	62			3,71	4,20	4,35	
		-6	-86	-16			3,99			3,91
	r	44	-72	-26	3,85	4,41	4,78	**4,98**	4,42	4,97
		18	-82	-18	3,42	3,75	3,96	4,11	4,11	3,91
Colliculus superior	l / r	-2	-38	4	3,48	4,00	4,33	**4,90**	3,78	4,36
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-50	20	-10		3,52	4,21	**4,57**	3,91	4,03
Thalamus	l / r	2	-2	6			3,76	**3,82**		
Sulcus temporalis superior (BA 21/22)		58	-44	2					**4,40**	
Lobus parietalis superior (BA 7)	l	-2	-78	40	3,71	3,90	3,86	3,84		3,31
		-12	-68	62					**4,00**	4,02
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l > r	-2	18	38		3,78			**3,88**	

SO = Stimulus onset, SP = Stimulus presentation, R = Response, RP = Response plus 1s, RP2 = Response plus 2s; MB = Miniblock

3.2.3 Implizites Erkennen semantischer Kohärenz

Die alleinige Betrachtung der impliziten Bedingung (cohim>baseline) zeigt, dass das frontale "Kohärenzerkennungsmuster" bereits in der impliziten Bedingung voll ausgebildet ist (Abb.12). Versucht man jene Komponenten zu isolieren, die spezifisch mit dem impliziten Erkennen korreliert sind [cohim>(cohex+incoh)], erhält man ein Netzwerk aus den erwähnten medialen und linkslateralen präfrontalen Arealen, eine Mehraktivierung frontopolar links, sowie ein ausgeprägtes temporoparietales Aktivierungsmuster, das den rechten oberen temporalen Sulcus (STS) und den beidseitigen unteren parietalen Kortex umfasst (Abb.10 und 11). Durch eine weitere Zerlegung in die Unterkontraste cohim>incoh und cohim>cohex wurde versucht, die Aktivierungsherde den beteiligten kognitiven Komponenten zuzuordnen. Der direkte Vergleich der impliziten Kohärenzurteile mit den inkohärenten Urteilen, also jenen Antworten, in denen keine explizite Lösung angegeben wurde, jedoch im ersten Fall zumindest ein Gefühl bestand, als würden die Worte zusammengehören (cohim>incoh = „ja, weiß nicht" vs. „nein, weiß nicht"), zeigt, dass sich das "frontale" Aktivierungsmuster (prä-SMA, IFG bilateral) im wesentlichen auf das

eigentliche Kohärenzerkennen zurückführen lässt, und zwar unabhängig davon, ob eine Lösung expliziert werden konnte oder nicht (Abb.13/15). Die differentielle Aktivierung im Bereich des inferioren Parietallappens beidseits und des Sulcus temporalis superior rechts, ließ sich hingegen auf den impliziten Charakter des Urteils zurückführen (cohim>cohex). Im Vergleich der Einzelzeitpunkte zeigt sich, dass der STS rechts, sowie parietale Kortex links bereits zum Zeitpunkt der Stimulusverarbeitung waren, während das inferior parietale Areal rechts und der hintere Hippokampus links erst zum Zeitpunkt der Antwort aktiviert wurden (Abb.15/16).

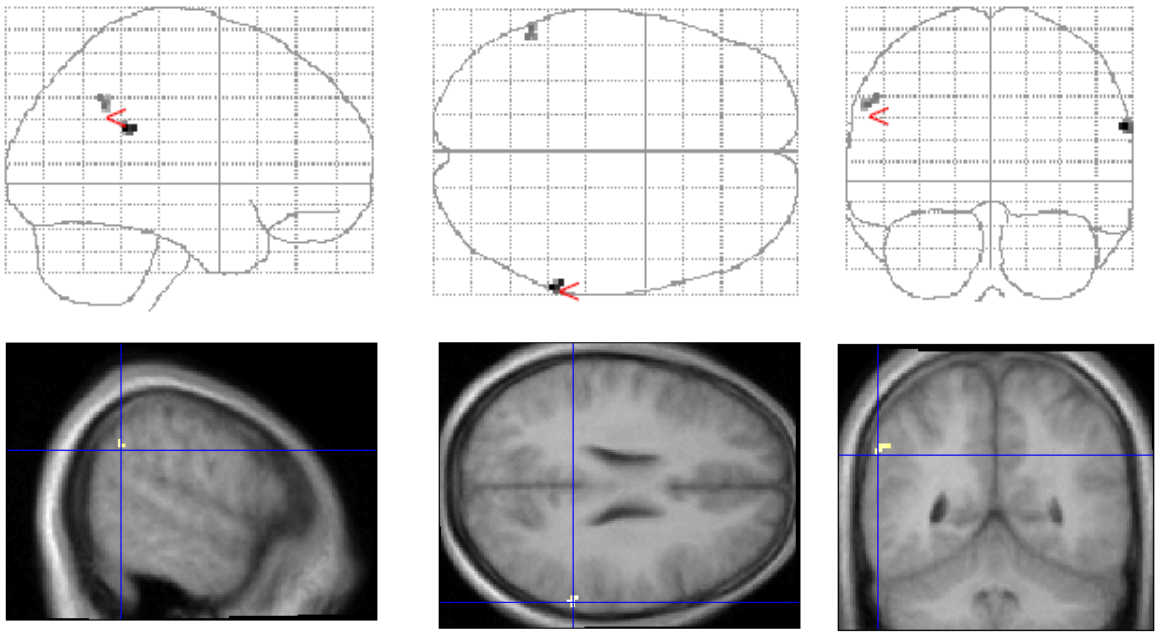
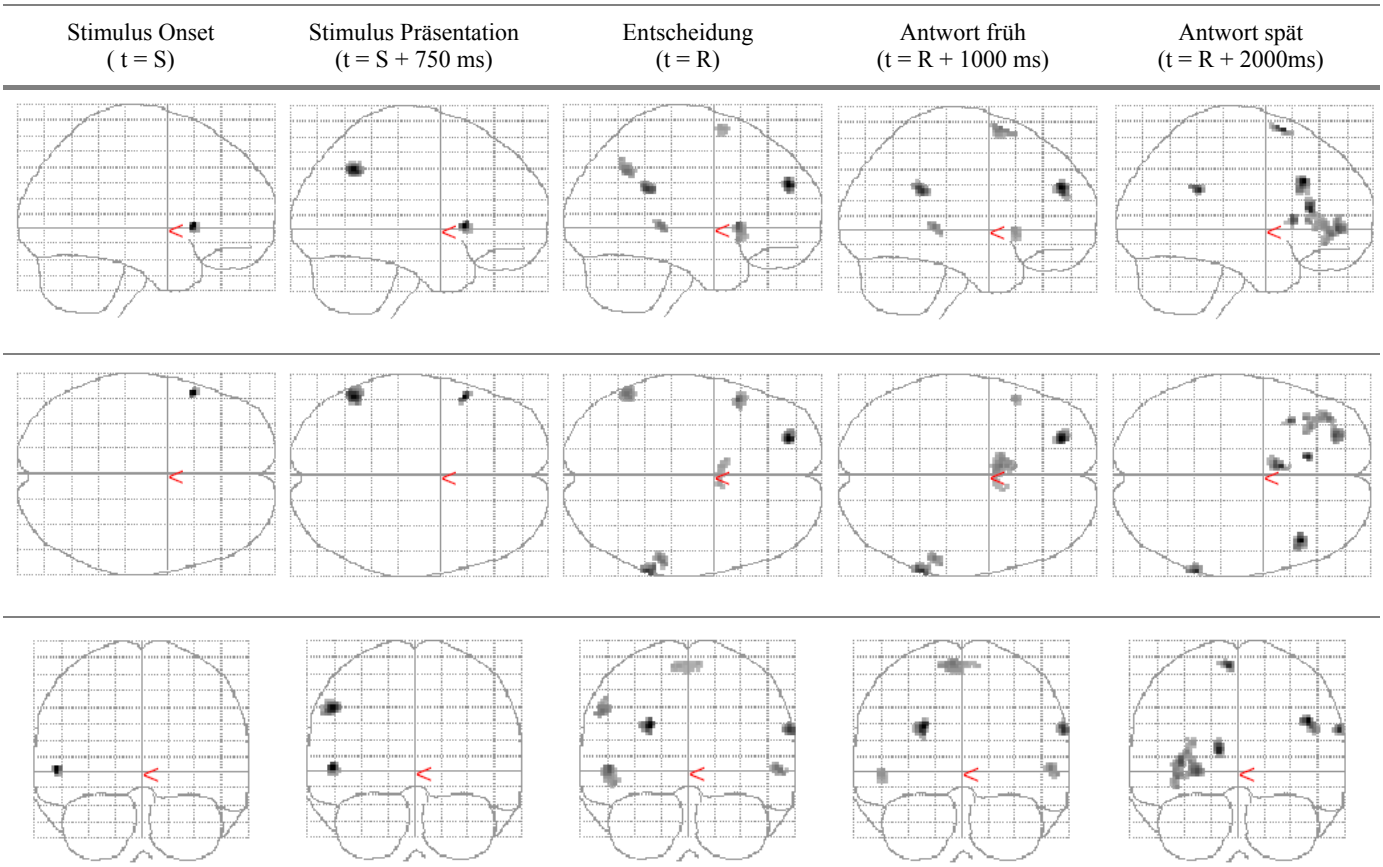


Abb. 10: [cohim > (cohex+incoh)] miniblock

Abb. 11: Spezifische Aktivierung der impliziten Bedingung [cohim > (cohex-incoh)]



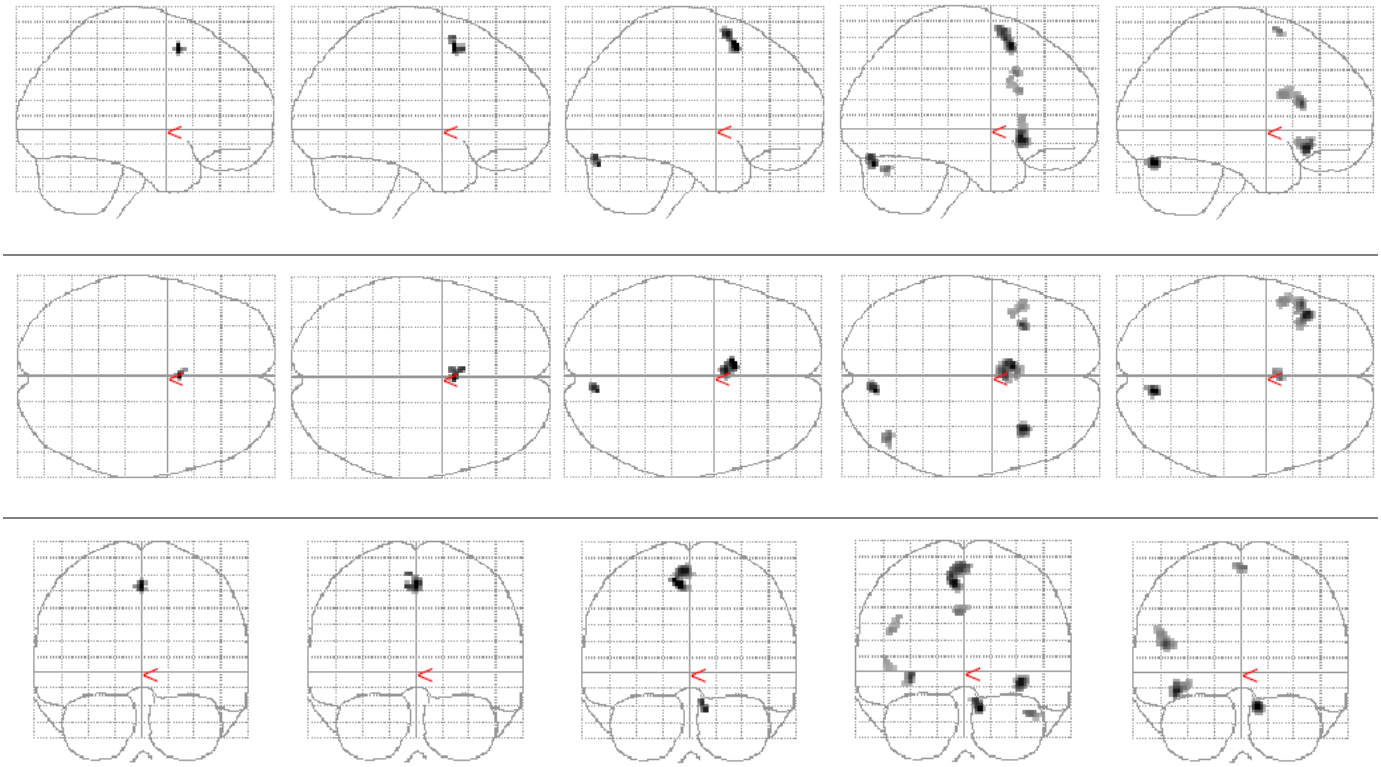
Z-Werte (p < 0.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-52	16	2	3,79	**3,94**	3,86	3,46		
Lobus parietalis inferior (BA 40)	l	-52	-58	40		**3,89**	3,67			3.26
	r	64	-44	26			4,03	4,15	**4,19**	3,50
Gyrus frontalis superior (frontopolar, BA 9)	l	-24	50	28			4,38	**4,46**	3,96	
(prä-SMA, BA 6)		-6	12	66			3,35	3,67	4,17	
Sulcus temporalis superior (BA 21/22)	r	56	-36	2			**3,64**	**3,64**		
Gyrus frontalis medius (BA 9)	r	44	26	32					**4,46**	
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l	-12	30	12					**4,25**	
Insula anterior (BA 13)	l	-36	18	6					**3,95**	

SO = Stimulus onset, SP = Stimulus presentation, R = Response, RP = Response plus 1s, RP2 = Response plus 2s; MB = Miniblock

Abb. 12: Implizite Beurteilung von semantischer Kohärenz (cohim > baseline)

Stimulus Onset (t = S)	Stimulus Präsentation (t = S + 750 ms)	Entscheidung (t = R)	Antwort früh (t = R + 1000 ms)	Antwort spät (t = R + 2000ms)



Z-Werte (p < 0.05 korrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-52	16	2	3,79	**3,94**	3,86	3,46		
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l > r	-6	14	56	4,92	5,00	5,23	**5,46**	5,17	4,90
Gyrus cinguli (BA 32)	l	-4	16	38				5,09		
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-34	20	-4				5,31		
		-40	26	-12					**5,52**	
	r	36	22	-8				**5,43**		
(BA 45)	l	-48	24	18				4,92	**5,35**	
(BA 46)		-46	20	26				**4,99**		
Cerebellum (Lobus posterior)	r	10	-74	-22			5,15	5,52	**5,65**	
		42	-68	-26				5,14		

SO = Stimulus onset, SP = Stimulus presentation, R = Response, RP = Response plus 1s, RP2 = Response plus 2s; MB = Miniblock

Abb. 13: Implizites Erkennen von semantischer Kohärenz: (cohim > incoh) miniblock

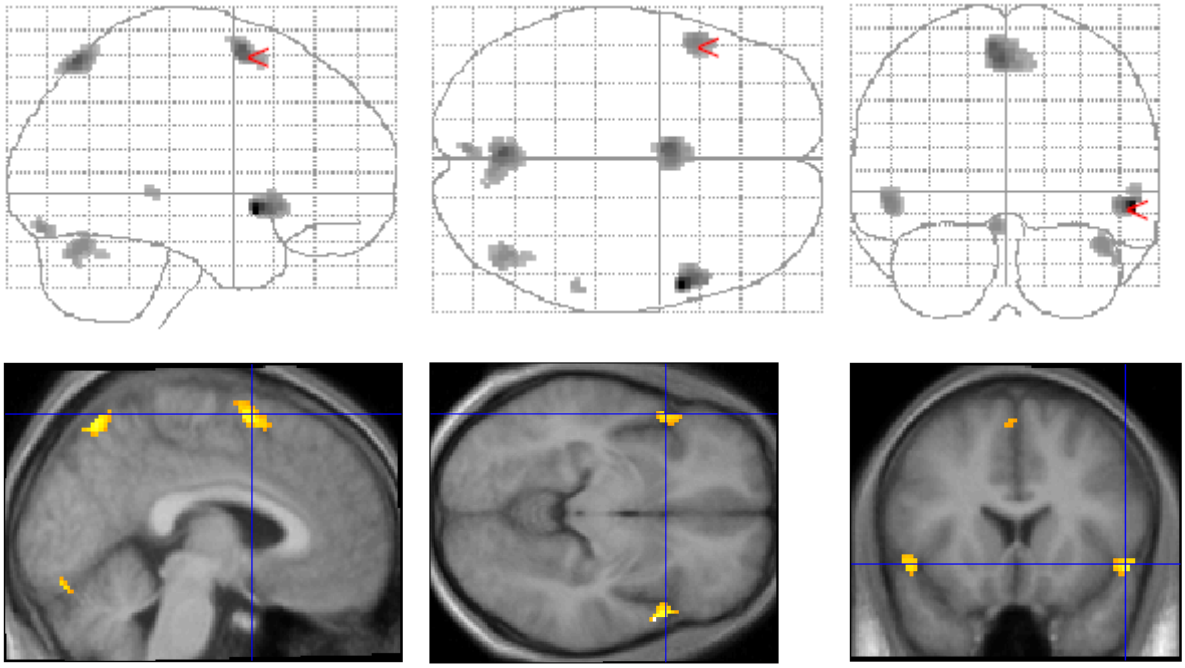


Abb. 14: Implizites vs. explizites Erkennen: (cohim > cohex) miniblock

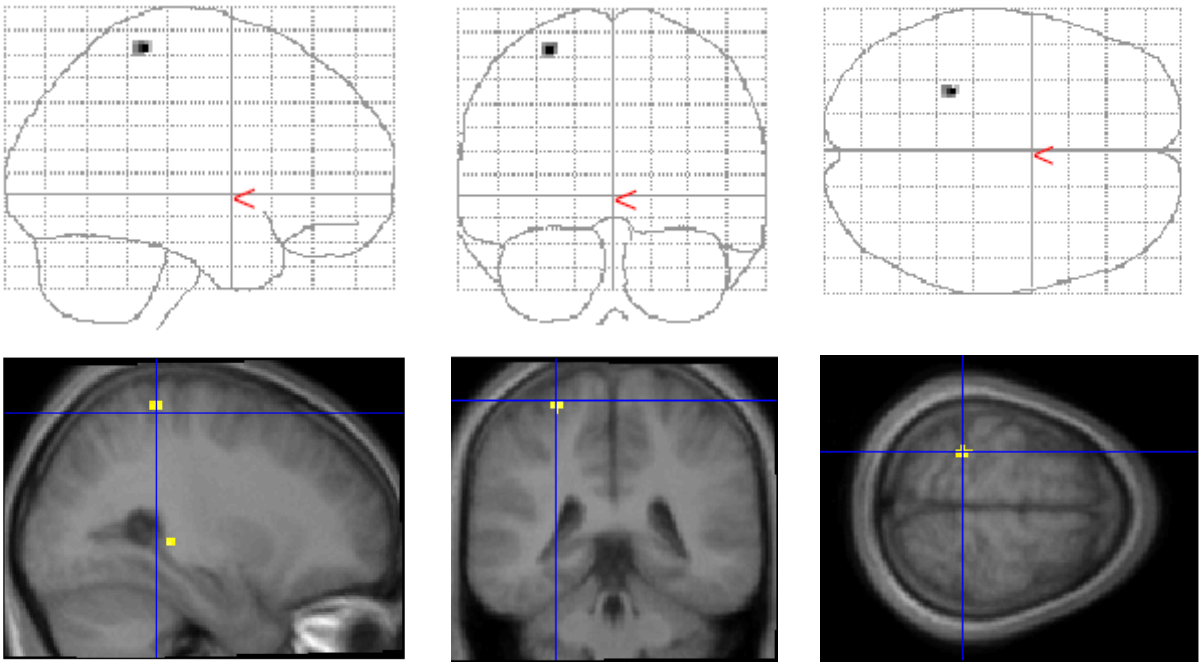
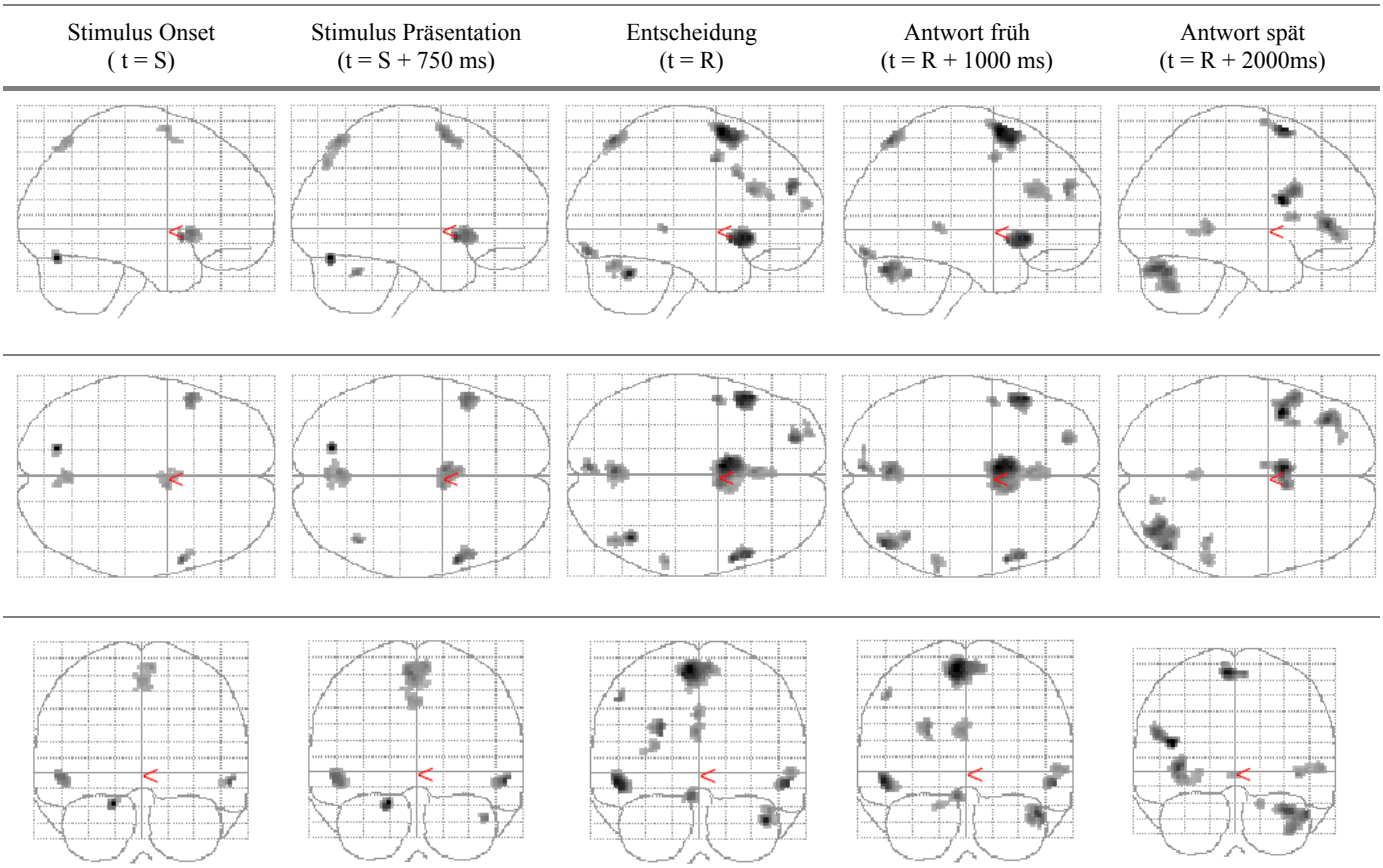


Abb. 15: Implizites Erkennen von semantischer Kohärenz (cohim > incoh)

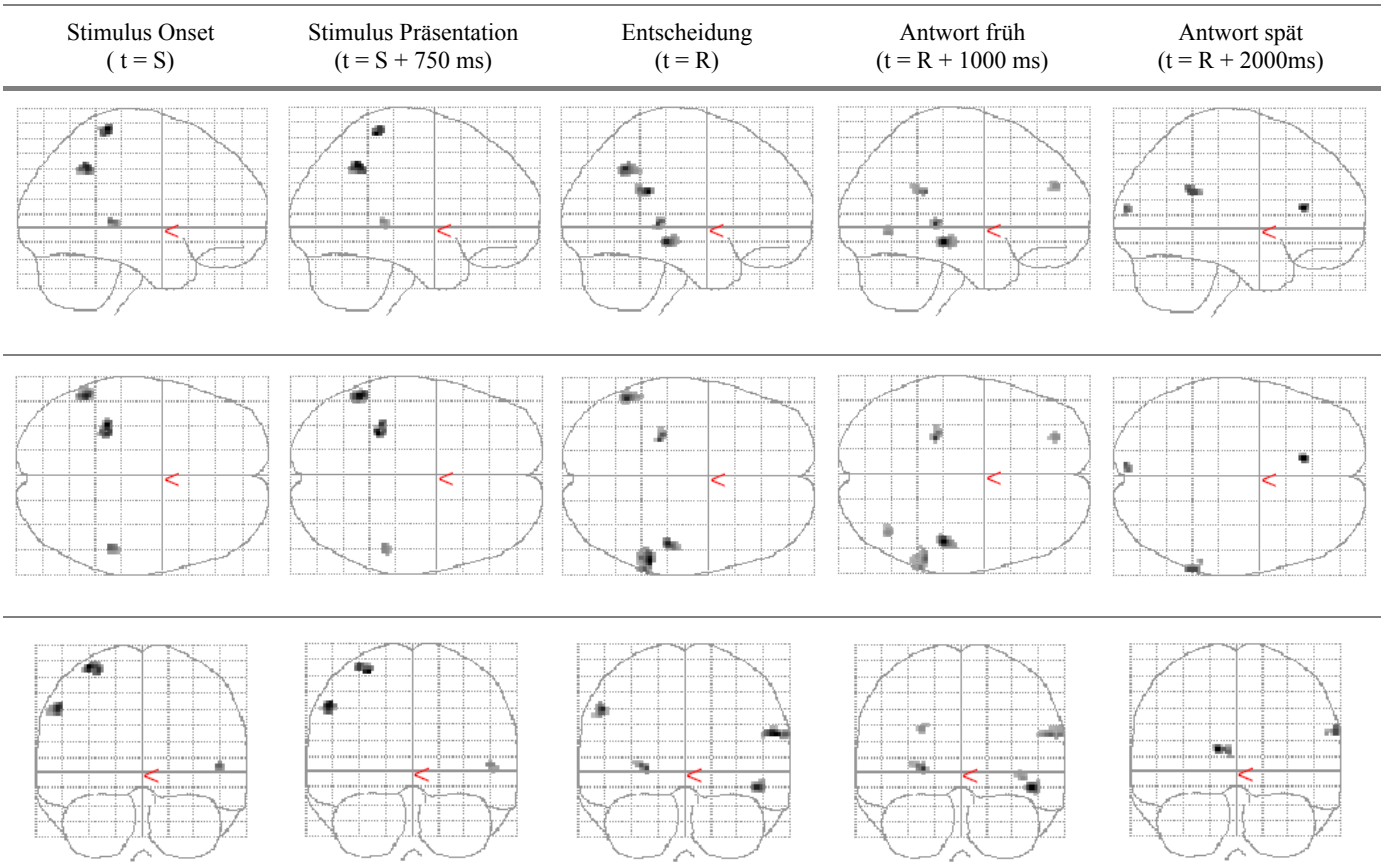


Z-Werte (p < 0.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Gyrus temporalis superior (BA 22/38)	r	56	10	-8		3,97	**4,04**	4,02		4,69
Gyrus frontalis superior (frontopolar, BA 9)	l	-24	50	28			**3,91**	3,71		
Gyrus praecentralis (BA 6)	l	-50	0	46			**3,71**	3,61		
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l	-2	24	26			**3,60**	3,53		
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-52	22	-6	3,61	3,73	4,24	**4,30**		3,68
		-42	8	20					4,82	
		-38	40	2					4,35	
		-36	18	8					3,71	
Lobus parietalis superior (BA 7)	l	-4	-68	60	3,27	3,62	3,88	**3,98**		4,08
Sulcus temporalis superior (BA 21/22)	r	58	-34	0			3,49	**3,48**		
Gyrus parahippocampalis (BA 19)		42	-40	-2					**3,74**	
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l > r	-6	10	66	3,44	3,72	4,38	4,51	**4,69**	4,00
Cerebellum (Lobus posterior)	l	-18	-74	-20	4,23	**4,34**	3,78	3,83		
	r	34	-72	-26		3,62	4,19	4,09	**4,27**	

3.2 Funktionelle Bilddaten

Abb. 16: Implizites vs. explizites Erkennen von semantischer Kohärenz (cohim > cohex)



Z-Werte (p < 0.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Lobus parietalis superior (Gyrus postcentralis, BA 2)	l	-28	-40	64	3,88	**3,92**				4,19
Lobus parietalis inferior (BA 40)	l	-52	-56	40	3,74	3,86	**4,07**			
	r	58	-40	24			**4,30**	3,83	3,64	
		40	-66	-4				3,50		
Sulcus temporalis superior (BA 21/22)	r	46	-28	-10	3,49	3,36	4,10	**4,44**		
Gyrus parahippocampalis (BA 27)	l	-24	-34	2			3,92	**4,09**		
Gyrus frontalis superior (frontopolar, BA 9)	l	-26	48	28				**3,49**		
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l	-12	30	14					**3,96**	
Gyrus occipitalis medius (BA 18)	l	-8	-92	14					**3,56**	

SO = Stimulus onset, SP = Stimulus presentation, R = Response, RP = Response plus 1s, RP2 = Response plus 2s; MB = Miniblock

3.2.4 Explizites Erkennen semantischer Kohärenz

Im entgegengesetzten Vergleich, das heißt dem Kontrast des expliziten und impliziten Erkennens von Kohärenz (cohex>cohim), findet sich eine Aktivierung des vorderen Gyrus frontalis inferior, die weiter anterior zu liegen kommt als in der impliziten Bedingung. Dazu zeigt sich ein komplexes Muster aus Aktivierungsherden im Bereich des vorderen Thalamus (Ncl. anterior thalami), der Basalganglien (linkes Putamen, rechter Nucleus caudatus), des Cingulum, des rechten Gyrus parahippocampalis und der oberen Vierhügelplatte (Abb. 17). Im zeitlichen Verlauf zeigt sich eine frühe Aktivierung des rechten Gyrus parahippocampalis, sowie des linksseitigen supplementärmotorischen Kortex, gefolgt von Aktivität im Bereich der motorischen Sprachareale, des Thalamus, der Basalganglien und der Lamina tecti, die zum Zeitpunkt der Kohärenzentscheidung ihre maximale Aktivierung erreicht. In der Modellierung des Entscheidungszeitpunktes zeigt sich zudem eine Aktivierung des vorderen und hinteren Cingulum, sowie des linksseitigen Kleinhirns (Abb. 18).

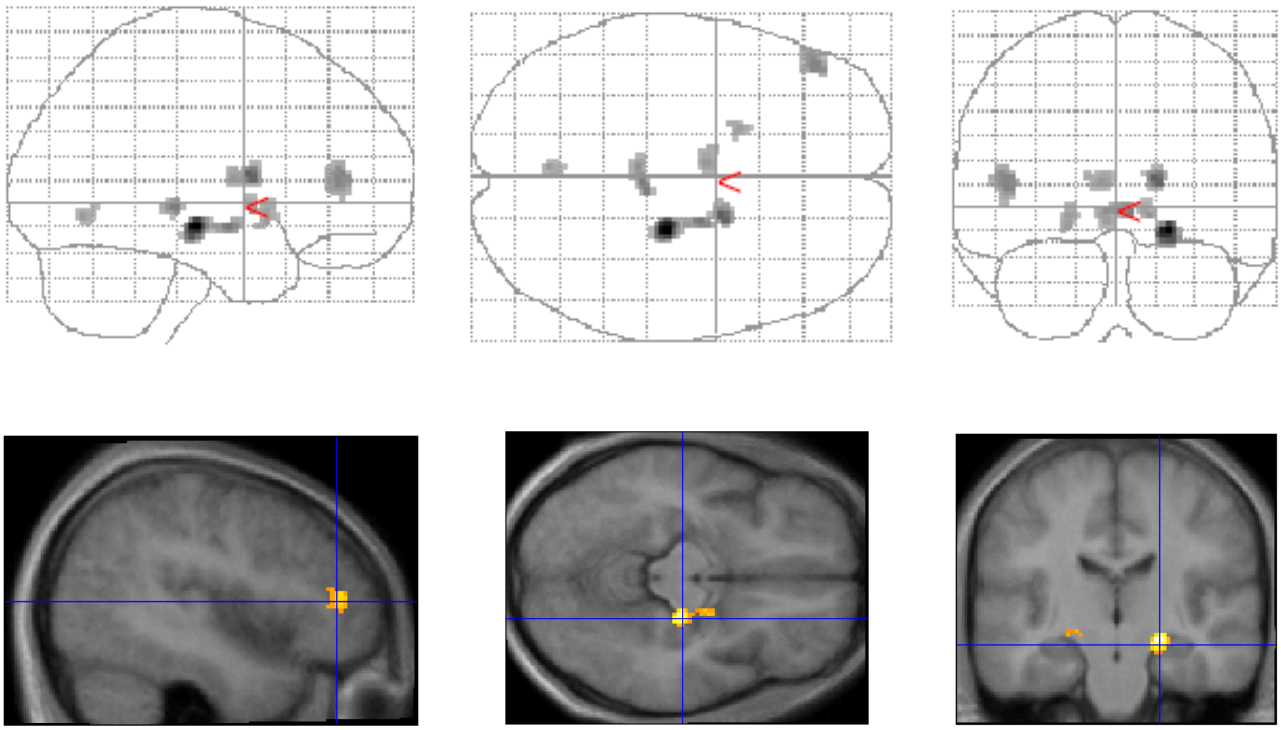
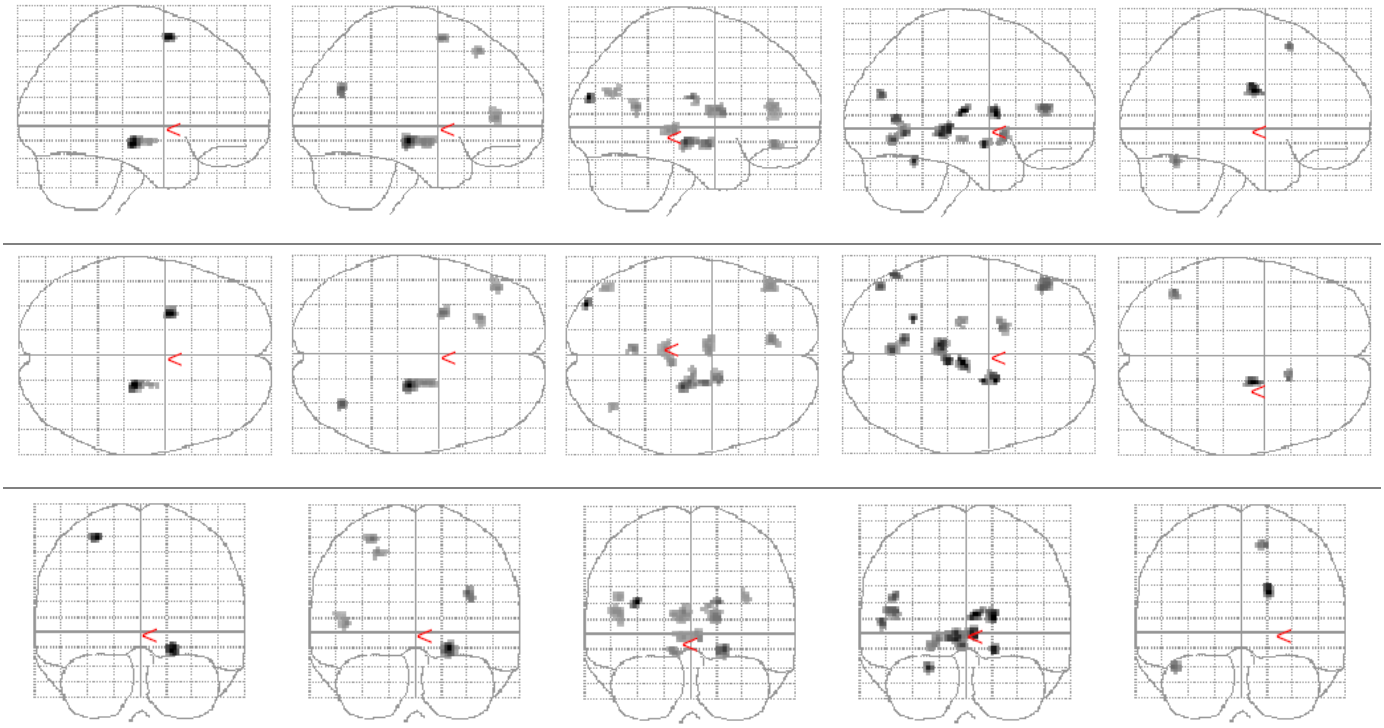


Abb. 17: (cohex > cohim) miniblock

Abb.18: Explizites vs. implizites Erkennen von semantischer Kohärenz (cohex>cohim)

Stimulus Onset (t = S)	Stimulus Präsentation (t = S + 750 ms)	Entscheidung (t = R)	Antwort früh (t = R + 1000 ms)	Antwort spät (t = R + 2000ms)



Z-Werte (p < 0.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel)

Anatomische Lokalisation (BA)		**x, y, z (mm)**			**SO**	**SP**	**R**	**RP**	**RP2**	**MB**
Gyrus frontalis medius (BA 6)	l	-28	4	60	**4,15**	4,0				3,38
Gyrus parahippocampalis (BA 35)	r	22	-20	-10	4,19	**4,91**	4,25	3,87		4,85
	l	-22	-18	-8				3,33		3,35
Gyrus temporalis medius (BA 39)	r	34	-66	26		**4,19**	3,44			
	l	-46	-74	26			3,46	3,63		
Gyrus temporalis medius (BA 37)	l	-54	-64	8				3,65		
Gyrus fusiformis (BA 37)	l	-44	-62	-22					3,53	
Gyrus frontalis superior (BA 8)	l	-24	28	52		**3,75**				
(BA 6)	r	16	16	56					3,54	
Gyrus frontalis inferior (BA 46)	l	-44	40	6		**3,74**	3,59	3,59		3,72
Gyrus occipitalis medius (BA 19)	l	-34	-86	20			**4,70**			
Nucleus caudatus	r	18	-8	26			**4,01**	3,99	**4,04**	4,07
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l	-10	40	-12			**3,74**			
Gyrus cinguli posterior (BA 23)		-4	-54	14			**3,74**			3,46
Thalamus (Ncl. anterior)	l	-4	-2	12			3,62			3,48
(Ncl. dorsomedialis)	r	6	-18	12				**3,96**		
Colliculus superior	l / r	4	-28	0			3,63	**3,84**		3,82
Cerebellum	l	-24	-52	-22				**3,84**		
(Lobus anterior, Lobus posterior)		-10	-58	-4				3,70		3,46
Putamen	l	-18	8	-4				**3,50**		3,46

3.2.5 Zusammenfassender Vergleich

Auf Grund der unterschiedlichen Anzahl von konstituierenden Ereignissen konnten nicht alle Kontraste auf einem für multiple Vergleiche korrigierten statistischen Niveau dargestellt werden. Um die verschiedenen Komponenten vergleichen zu können, werden die Ergebnisse im folgenden noch einmal auf einem standardisierten statistischen Niveau gegenübergestellt ($p < 0.001$ unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 Voxel). Die entsprechenden Z-Werte werden im Anhang zusammengefasst (Tab. III und IV).

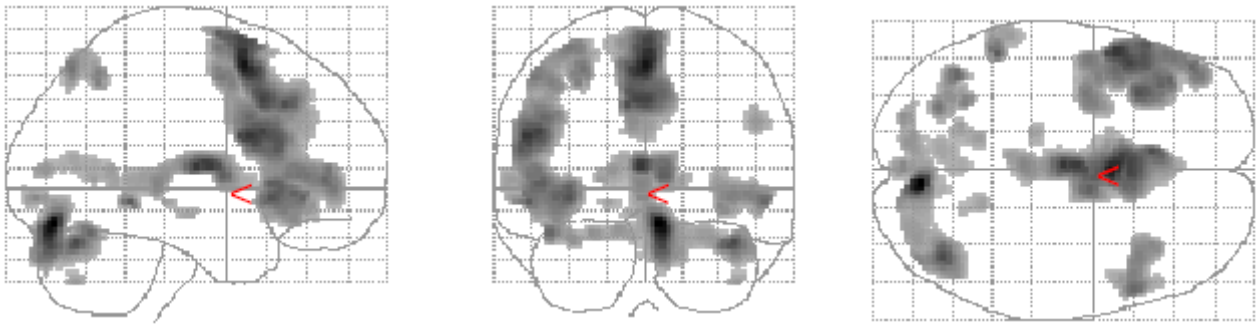
In Bezug auf die Beurteilung und das Erkennen von semantischer Kohärenz, d.h. die „inhaltlichen" Aspekte der Aufgabe, ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede in der Modellierung der einzelnen Zeitpunkte, so dass diese Ergebnisse in der Miniblock-Darstellung zusammengefasst werden, welche die entsprechenden Bedingungen als ausgedehntes singuläres Ereignis zusammenfasst (Abb. 19). Die Beurteilung und das Erkennen von semantischen Kohärenz (a) beruhte im wesentlichen auf einem beidseitigen frontolateralen und frontomedianen Netzwerk, und zwar unabhängig davon, ob die Entscheidung implizit oder explizit getroffen wurde (b). Das Netzwerk war bereits aktiv, wenn eine Lösung lediglich implizit vermutet wird (c).

Im Gegensatz zu den inhaltlichen Aspekten der Aufgabe zeigt sich bei der Analyse der prozessbezogenen Kontraste, d.h. der Frage wie etwas erkannt wurde (implizit vs. explizit), eine deutliche zeitliche Abfolge der Aktivierungen. Abb. 20 fasst noch einmal die differentielle Aktivierung des impliziten und expliziten Erkennens von semantischer Kohärenz zu Beginn der Aufgabe (SO) und zum Zeitpunkt der Entscheidung (R) zusammen. In der Gegenüberstellung wird deutlich, dass das implizite Erkennen von semantischer Kohärenz auf einem posterioren temporoparietalen Netzwerk beruht, das Areale im Bereich des inferioren und superioren parietalen Kortex beider Seiten, des rechten Sulcus temporalis superior (STS), sowie des linken posterioren Gyrus parahippocampalis umfasst. Im Gegensatz resultierte das explizite Erkennen semantischer Kohärenz in einer signifikanten Mehraktivierung des rechten parahippocampalen Gyrus, zusammen mit einer Aktivierung im Bereich der Basalganglien (prädominant Nucleus caudatus und Putamen rechts), des vorderen und hinteren Cingulum, sowie des Gyrus frontalis inferior links, die mit dem Zeitpunkt des expliziten Erkennens korrelierte. In Bezug auf das implizite Erkennen zeigt sich eine deutliche Abfolge der parietalen Aktivierung. Während zu Beginn der Stimuluspräsentation die linksseitige parietale

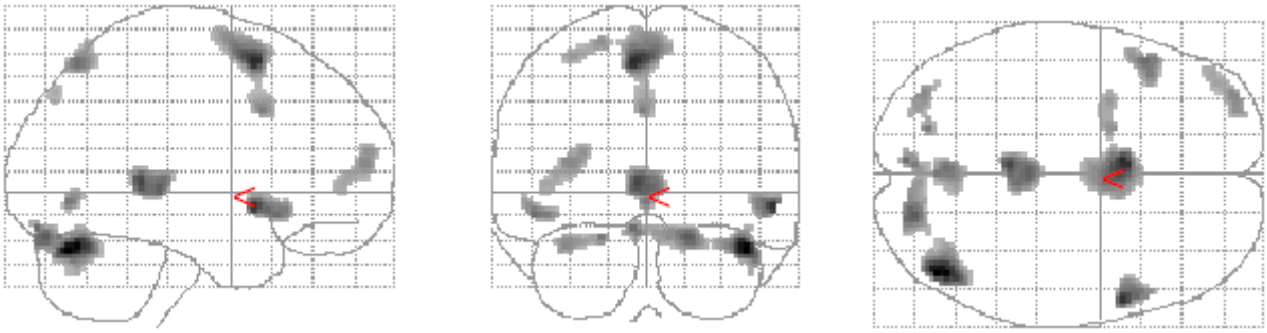
Aktivierung führt, dominiert zum Zeitpunkt der Entscheidung die Aktivität des rechten parietalen Kortex, zusammen mit einer zunehmenden Aktivierung des rechten STS.

Abb. 19: Beurteilung und Erkennen von semantischer Kohärenz (miniblock)

Beurteilung semantischer Kohärenz [(cohim+cohex+incoh) > baseline]

a 

Erkennen semantischer Kohärenz [(cohim+cohex) > incoh]

b 

Implizites Erkennen semantischer Kohärenz [cohim > incoh]

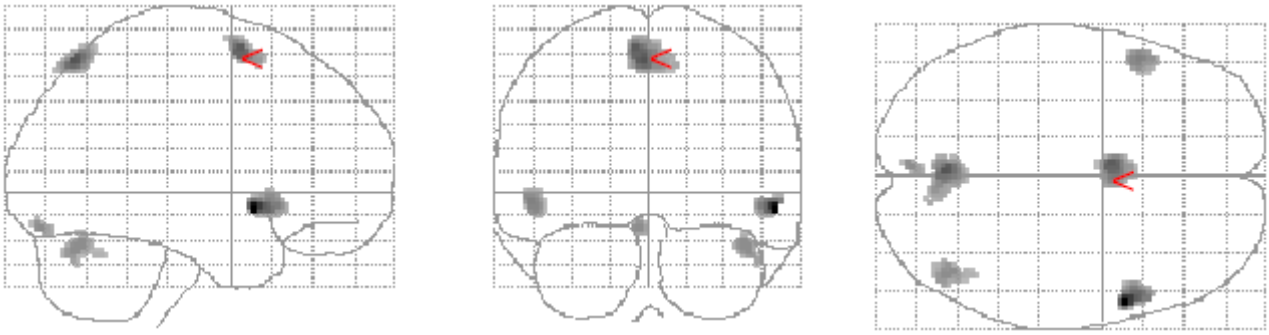
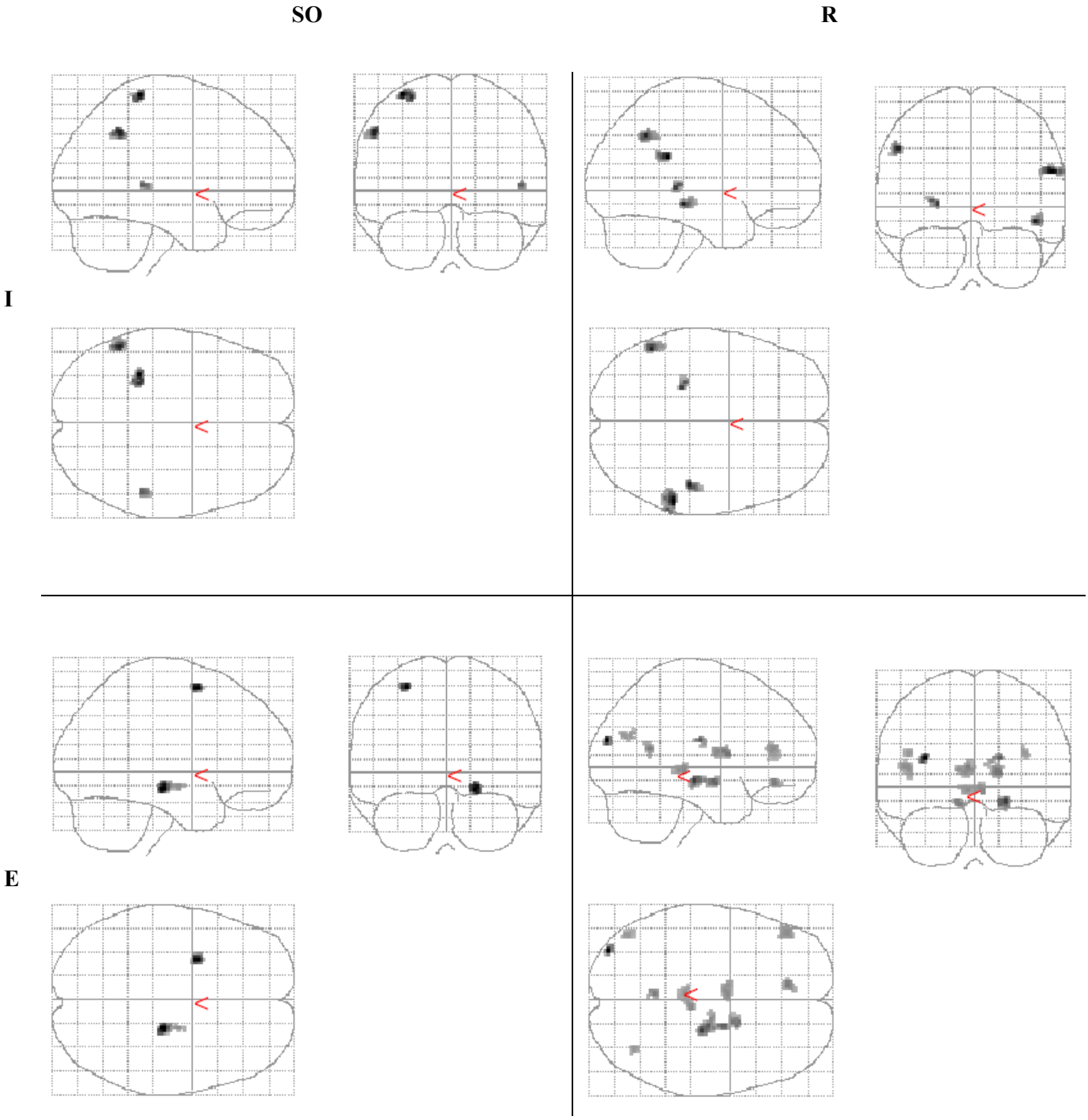
c 

Abb. 20: Vergleich des impliziten und expliziten Erkennens von Kohärenz



SO = Stimulus onset, R = Response; I = (cohim > cohex), E = (cohex > cohim)

4 Diskussion

Die folgende Diskussion gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die funktionellen Ergebnisse des Experiments diskutiert und in den Kontext der relevanten Literatur gestellt. Die Diskussion der anatomischen Korrelate erfolgt anhand der inhaltlichen Aspekte des Experiments, sprich der Beurteilung von Kohärenz, Implizitheit und Explizitheit der Anworten. Dem folgt eine kritische Beurteilung der eingeführten methodischen Neuerungen in Bezug auf aktuelle Entwicklungen im Feld der funktionellen Kernspintomographie.

4.1 Aktivierungsmuster

4.1.1 Beurteilung und Erkennen semantischer Kohärenz

Die gemeinsame Auswertung aller Teilbedingungen (task-baseline) zeigt, dass die Beurteilung semantischer Kohärenz im wesentlichen auf einem linksbetonten frontomedianen und inferior lateralen präfrontalen Netzwerk beruht, das den Gyrus inferior lateralis und prä-supplementärmotorischen Kortex (prä-SMA) links, sowie den Gyrus frontalis superior rechts, den linken Thalamus (Ncl. anterior) und das rechte Kleinhirn (Vermis und rechte Hemisphäre) umfasst. Die Differenzierung in kohärente und inkohärente Urteile (coh>incoh) ergibt zudem eine relative Mehraktivierung des prä-SMA und rechten Kleinhirns in den Fällen, in denen implizit oder explizit eine Kohärenz wahrgenommen wurde, so dass vermutet werden kann, dass die semantische Analyse im wesentlichen in den rechts- und linksfrontalen Sprachareale erfolgt, während die eigentliche Beurteilung der semantischen Kohärenz über den frontomedianen Kortex und das rechte Kleinhirn erfolgt. Die zeitliche Analyse deutet eine sukzessive Abfolge der beteiligten Aktivierungen an. Der Thalamus zeigte die früheste Aktivierung und war nur zu Beginn der Stimuluspräsentation aktiviert (S und SP), wohingegen die Kleinhirnaktivität eindeutig mit dem Entscheidungszeitpunkt korrelierte (SP, R und RP). Die Aktivierung des prä-supplementär motorischen Kortex, der offensichtlich eher koordinative Funktionen

wahrzunehmen scheint, zieht sich von der frühen Analyse der Stimuli (SP) bis zur expliziten Antwort (RP). Während die linksseitigen Sprachareale (Gyrus frontalis inferior) über den gesamten Entscheidungsprozess aktiv sind (R-RP2), korreliert die Aktivierung des rechten präfrontalen Kortex (Gyrus frontalis inferior) eindeutig mit der Suche nach einer expliziten Antwort (RP und RP2). Im folgenden werden die einzelnen Aktivierungen gemäß ihrer Reihenfolge diskutiert.

Thalamus

Zu Beginn der Aufgabe zeigt sich eine deutliche Aktivierung des vorderen Thalamus, die als Ausdruck der gesteigerten Aufmerksamkeit interpretiert werden kann. Interessanterweise scheint sich die Aktivierung auf den Ncl anterior zu projizieren, der schon von Papez als Schaltzentrale einer limbisch-kortikalen Assoziationsschleife postuliert wurde und über eine direkte Verbindung zum vorderen Cingulum verfügt, das im späteren Verlauf der Verarbeitung aktiv wird (Papez 1937; Duus 1995). Neben einer allgemeinen aufmerksamkeitsassoziierten Funktion gibt es seit längerem Studien, die eine direkte oder indirekte Beteiligung des Thalamus bei sprachlichen Prozessen nahe legen (Radanovic and Scaff 2003). So berichten Raymer et al. von zwei Patienten mit überwiegend thalamischen Infarkten, die durch ausgeprägte Wortfindungs- und Benennstörungen auffielen (Raymer, Moberg et al. 1997). Im Sinne der neuronalen Netzwerktheorie geht man davon aus, dass Objekte nicht im Sinne einer streng definierten neuronalen Einheit lokalisiert sind, sondern in einer verteilten Aktivierung verschiedener neuronaler Areale, welche die relevanten Teilaspekte des jeweiligen Objekts repräsentieren. Wie die einzelnen Features zu einer Einheit zusammengebunden werden ist nach wie vor unklar und Thema der sogenannten „Binding“-Debatte. In einer fMRT-Studie über die mentale Vorstellung von Objekten zeigte sich eine deutliche Aktivierung des Thalamus. Dabei wurden zwei Begriffe präsentiert, die entweder zu der Aktivierung eines dritten Objekts führten („Wüste, Hügel – > Kamel“) oder nicht. Eine Mehraktivierung des Thalamus zeigte sich immer dann, wenn ein Objekt erkannt wurde, nicht jedoch durch eine rein semantische Assoziation der Begriffe. Unabhängig davon, ob ein Objekt erkannt wurde, die Begriffe assoziiert waren oder nicht, resultierte die Aufgabe in einer signifikanten Aktivierung eines Areals im Bereich des prä-supplementär motorischen Kortex (prä-SMA), welches der beobachteten frontomedianen Aktivierung entspricht und bereits auf die im folgenden diskutierte Rolle

des prä-SMA bei der Koordination und Beurteilung unterschiedlicher sprachlicher Information hinweist (Kraut, Kremen et al. 2002).

Kleinhirn

Im weiteren Verlauf kommt es zunächst zu einer Aktivierung im Bereich des rechten Kleinhirns, die bereits vor der Entscheidung auftritt und zum Zeitpunkt der Antwort ihren Höhepunkt erreicht. Nachdem sowohl die motorischen Sprachareale der linken Seite mit der rechten Kleinhirnhemisphäre verbunden sind, als auch die Koordination der rechten Hand ipsilateral erfolgt, könnte die rechtsbetonte Aktivierung des Kleinhirns als Ausdruck der sprachlichen Artikulation und motorischen Koordination der Finger verstanden werden. Eine funktionelle Kernspinstudie hat jedoch gezeigt, das auch das stille Rezitieren von einfachen Begriffen bereits in einer messbaren Aktivierung der rechten Kleinhirnhemisphäre resultiert (Ackermann, Wildgruber et al. 1998). In diesem Sinne könnte man also davon ausgehen, dass die Aktivierung des Kleinhirns nur zum Teil auf die eigentliche sprachliche Artikulation zurückzuführen ist. Das würde auch die Mehraktivierung in der impliziten Bedingung erklären, bei der ja kein Lösungswort generiert wurde, also auch keine höhere Anforderung an die exekutive artikulatorische Koordination bestand. Es wäre also denkbar, dass bereits das Erkennen der Antwortbedingung und die Suche nach einer expliziten Lösung zu einer bereitstellenden Aktivierung der erforderlichen koordinativen Areale führt.

Zahlreiche Studien weisen allerdings darauf hin, dass das Kleinhirn, insbesondere die Kleinhirnhemisphären, nicht nur für die Koordination von Bewegungen zuständig ist, sondern auch für die sprachlicher und anderer höherer kognitiver Funktionen (Leiner, Leiner et al. 1989; Leiner, Leiner et al. 1993; Bloedel and Bracha 1997; Schmahmann and Pandya 1997). Es wird diskutiert, ob das Kleinhirn ähnlich den Basalganglien eine Funktion beim Lernen und der Koordination motorischer Programme und komplexer Zusammenhänge ausübt (Ivry and Baldo 1992; Bracha, Zhao et al. 2000; Doya 2000; Middleton and Strick 2000). Mehrere Autoren nehmen eine zentrale Rolle des Kleinhirns bei der Verarbeitung sprachlicher Stimuli an. So zeigen Studien an Kleinhirn-Patienten, dass bei cerebellären Schäden vor allem die zeitliche Analyse der phonematischen Struktur beeinträchtigt ist (Ackermann, Graber et al. 1997; Ackermann, Graber et al. 1999; Ackermann, Graber et al. 1999). Mathiak et al. haben das Verständnis von in verschiedenen

Aspekten modulierten Phonemen mit funktioneller Kernspintomographie untersucht und festgestellt, dass die Analyse der zeitlichen Abfolge (gedehnte oder ungedehnte Vokale) mit einer Aktivierung des rechten Kleinhirns korreliert (Mathiak, Hertrich et al. 2002). Die Befunde der phonematischen Sprachexperimente scheinen die Annahme von Keele und Ivry zu bestätigen, die bereits 1990 vorgeschlagen haben, dass das Kleinhirn in erster Linie für zeitliche „Berechnungen“ motorischer und perzeptiver Inhalte zuständig sein könnte (Keele and Ivry 1990).

Funktionelle bildgebende Studien deuten jedoch auch auf eine Rolle bei der isolierten Beurteilung semantischer Sachverhalte hin. Eine fMRT-Studie von Fulbright et al., in der Wortpaare nach semantischen (Worte der gleichen Kategorie?) und phonematischen Gesichtspunkten (Reimen sich die Worte?) beurteilt werden sollten, ergab eine rechtshemisphärische Aktivierung des Kleinhirns und des Kleinhirnwurms in der semantischen Bedingung (Fulbright, Jenner et al. 1999). Die Wichtigkeit des Cerebellums für eine intakte Sprach- und Informationsverarbeitung wird von Läsionsstudien untermauert. Schatz et al. haben ein Kind mit einer fokalen Schädigung des linken Kleinhirns neuropsychologisch untersucht. Das Kind zeigte eine generelle Verlangsamung in verschiedenen kognitiven Tests, wobei die Beeinträchtigung bei sprachlichen Aufgaben besonders ausgeprägt war (Schatz, Hale et al. 1998). Gasparini et al. berichten über einen Patienten mit Sprachstörungen nach einem isolierten Infarkt des rechten Kleinhirns. Die Sprachstörungen umfassten sowohl das Sprachverständnis, als auch den Sprachausdruck, wobei Wortfindungsstörungen und das Auslassen von Wörtern im Vordergrund standen. Trotz aufwändiger bildgebender Untersuchungen konnte keine weitere Läsion gefunden werden (Gasparini, Di Piero et al. 1999). Ähnliche sprachliche Symptome zeigte ein Patient mit einer idiopatischen Kleinhirndegeneration, der ausserdem deutliche Defizite in Tests der verbalen Intelligenz, verbalen Assoziationsfähigkeit, Wortflüssigkeit, sowie räumlichen Aufgaben aufwies (Akshoomoff, Courchesne et al. 1992).

Tierexperimentelle Studien über den retrograden neuronalen Transport von Herpes Simplex Viren (HSV I) lassen Schlüsse über die efferente kortikale Verknüpfung des Kleinhirns zu. Demnach verfügen die Module des Kleinhirns über weitreichende direkte Verbindungen zum motorischen, prämotorischen und präfrontalen Kortex (Middleton and Strick 1997). Neuere Tracer-Studien an menschlichen Primaten bestätigen die Verknüpfung mit medialen

und inferioren und dorsolateralen Anteilen des präfrontalen Kortex (Middleton and Strick 2001).
An Hand von Computersimulationen des neuronalen Verschaltungsmusters wird vermutet, dass sich das Kleinhirn auf Grund seines hochgradig modularen und parallelen Aufbaus, offensichtlich besonders eignet Informationen verschiedener Domänen zu verarbeiten und so motorische, sensorische, kognitive und linguistische Koordinationsfunktionen wahrzunehmen (Leiner, Leiner et al. 1991; Leiner and Leiner 1997). Bower geht sogar davon aus, das das Kleinhirn keine konkrete eigene Funktion hat, sondern primär für eine von der Modalität unabhängige Verarbeitung und den Abgleich sensorischer Information zuständig ist (Bower 1997; Bower 2002).

Linksfrontales Aktivierungsmuster (Gyrus frontalis inferior)

Die Summenanalysen der Gesamtaufgabe (task-baseline), sowie des impliziten Erkennens von Kohärenz (cohim>baseline) zeigen, dass die Beurteilung semantischer Kohärenz auf der Aktivierung eines linksbetonten medial-lateralen präfrontalen Netzwerkes beruht, das Areale des medialen prä-supplementär motorischen Kortex (prä-SMA) und Gyrus frontalis inferior unfasst.

Die Rolle des präfrontalen Kortex bei der Sprachverarbeitung ist seit 1862 bekannt, als Broca zum ersten Mal über einen Patienten mit motorischer Sprachstörung berichtete, der eine isolierte Läsion im Bereich des Gyrus frontalis inferior (IFG) erlitten hatte (Broca 1861). Zahlreiche klinische, neuropathologische und bildgebende Studien weisen darauf hin, dass der IFG nicht nur am Sprachausdruck beteiligt ist, sondern auch eine entscheidende Rolle beim Sprachverständnis spielt, wie bei der Analyse komplexer syntaktischer Strukturen und Bearbeitung semantischer Aufgaben (Bookheimer 2002). Man geht inzwischen davon aus, dass höhere sprachliche Funktionen nicht so scharf lokalisiert sind wie ehemals angenommen. Kortikale Elektrostimulationsstudien an neurochirurgischen Patienten ergaben eine ausgeprägte Variabilität der Lokalisation sprachrelevanter Areale. Die individuellen eloquenten Areale liessen sich zwar exakt lokalisieren, zeigten jedoch eine ausgeprägte interindividuelle Spannbreite, die in der Regel ein inferior präfrontales und ein oder mehrere temporoparietale Areale umfasste (Ojemann, Ojemann et al. 1989). Die klassische Einteilung in temporal-Verständnis und frontal-Ausdruck lässt sich nach den Ergebnissen von Ojemann nicht aufrecht erhalten. Bei

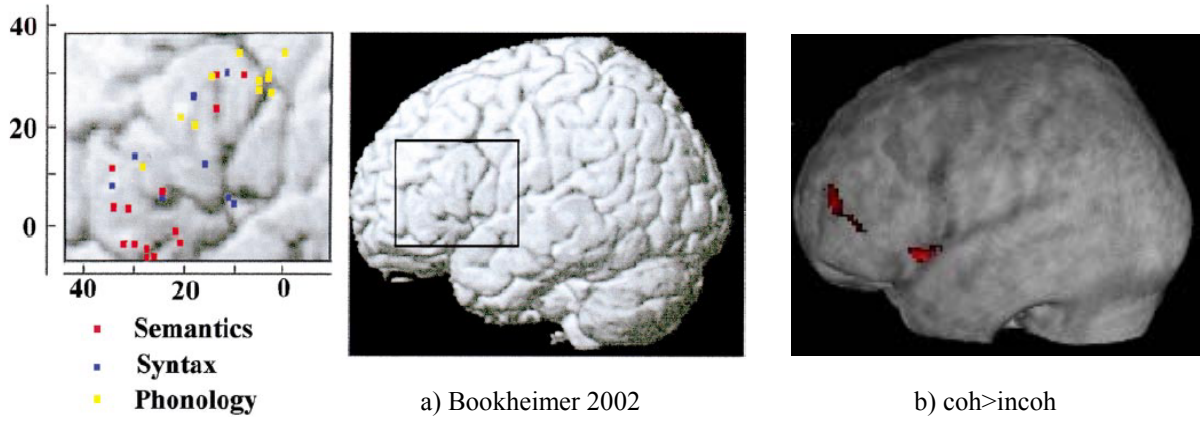
Reizungen des frontalen Kortex konnte er sowohl semantische, phonologische, als auch artikulatorische Störungen feststellen. Bereits Luria hatte berichtet, dass manche Broca-Patienten Probleme beim Verständnis komplexer syntaktischer Strukturen aufwiesen (Luria 1966). Mehrere neuroanatomische Studien fanden ebenfalls keinen Hinweis auf die exklusive Assoziation von „motorischer“ Aphasie mit dem Brodmann Areal 44. Untersuchungen an Broca-Patienten zeigen eine heterogene Beteiligung des IFG, je nachdem ob Artikulationsstörungen, syntaktische Defizite oder Benennstörungen führen (Alexander, Naeser et al. 1990).
Mit Hilfe bildgebender Studien ist es nun möglich Teilaspekte sprachlicher Verarbeitung zu differenzieren. Prinzipiell scheint die Aktivierung des IFG nicht an die eigentliche sprachliche Artikulation gebunden zu sein. Bookheimer und Gabrieli berichten über Broca-Aktivität sowohl bei der gesprochenen als auch stummen Lösung verschiedener sprachlicher Aufgaben (Bookheimer, Zeffiro et al. 1995; Gabrieli, Poldrack et al. 1998). Die Ergebnisse einer Studie von Palmer, bei der es um die Ergänzung von Wortstämmen ging, deuten darauf hin, dass der Unterschied zwischen offener und stummer Bearbeitung lediglich in der Ausprägung der Aktivität, nicht jedoch in deren Lokalisation liegt (Palmer, Rosen et al. 2001). Diese Annahme passt gut zu der vorliegenden Beobachtung, dass die zur Lösung der untersuchten semantischen Aufgabe notwendigen Areale des IFG bereits in der impliziten Bedingung aktiv sind, allerdings nicht so ausgeprägt wie in der expliziten Bedingung (siehe cohim>cohex vs. cohex>cohim).

Die Koordinaten eines PET-Experiments, bei dem semantische Assoziationen generiert werden mussten, stimmen mit der beobachteten Aktivierung des vorderen IFG überein (Petersen, Fox et al. 1988). Mehrere semantische Primingstudien weisen ebenfalls auf eine Rolle des IFG bei der semantischen Informationsverarbeitung hin. In einer fMRT-Studie von Wagner sollten Probanden entscheiden, ob bestimmte Wörter konkret oder abstrakt waren (semantische Entscheidung), bzw. groß oder klein geschrieben wurden (perzeptionelle Entscheidung). Bei der Wiederholung der semantischen Entscheidung zeigte sich ein deutlicher Priming-Effekt im vorderen IFG (Wagner, Koutstaal et al. 2000). In einer Reihe ähnlicher Experimente untersuchten Buckner et al. Primingeffekte in einer Wortstammergänzungsaufgabe. Dabei fanden sie zwei exakt lokalisierte priming-spezifische Aktivitätsherde im vorderen unteren und hinteren IFG, die interessanterweise unabhängig davon in Aktion traten, ob der Wortstamm visuell oder auditorisch präsentiert

wurde (Buckner, Koutstaal et al. 2000). In der Analyse des semantischen Gehalts von sprachlicher Information scheint insbesondere dem vorderen Anteil des IFG eine entscheidende Rolle zuzukommen. Poldrack untersuchte das gleiche Wortmaterial in Bezug auf perzeptionelle (Groß-Kleinschreibung), phonologische (Silben zählen) und semantische Fragestellungen (Entscheidung konkret-abstrakt) und beobachtete eine spezifische Aktivierung des vorderen Anteils des IFG in Bezug auf semantische Anforderungen (Poldrack, Wagner et al. 1999). Dapretto et al. benutzten ein anderes Design um syntaktische und semantische Analyse zu differenzieren. Sie benutzten nahezu identische Sätze, in denen entweder ein einzelnes Wort (Semantik) oder die Wortfolge (Syntax) leicht verändert wurden, woraufhin die Probanden entscheiden mussten, ob sich der Sinn des Satzes geändert hatte. Beide Bedingungen resultierten in einer ausgedehnten linksbetonten frontalen Aktivierung bereits beschriebener sprachrelevanter Areale. Der differentielle Vergleich der semantischen und syntaktischen Bedingung ergab wiederum eine Mehraktivierung im Bereich des vorderen IFG, der sich ziemlich genau mit der Aktivierung des IFG in den Zielbedingungen (cohim, cohex, incoh) deckt, während sich die syntaktische Bedingung im mittleren Teil des IFG im Bereich der pars triangularis (BA 45) abzeichnete.

Während auf Grund dieser und ähnlicher Ergebnisse die meisten Autoren davon ausgehen, dass insbesondere der vordere Anteil des IFG auf irgendeine Weise in der semantischen Sprachverarbeitung involviert ist, argumentieren Thompson-Schill und andere, dass der vordere IFG nicht für die semantische Analyse im engeren Sinn, sondern eher allgemein für die Selektion und das Management konkurrierender aufgabenrelevanter Information zuständig sein könnte. Sie gründen ihre Annahme auf Wortexperimente, bei denen in allen Bedingungen semantische Aussagen getroffen werden mussten (wie zwei Begriffe sind miteinander verwandt oder nicht), die Bedingungen allerdings so gestaltet waren, dass die Lösung allgemein oder auf Grund bestimmter Features gefunden werden sollte, bzw. durch irrelevante oder relevante Information geprimed wurde. Entsprechend ihrer Annahme fanden sie eine signifikante Mehraktivierung des vorderen IFG immer dann, wenn der Entscheidungskonflikt größer war, d.h. in der „feature“-Bedingung und bei der Verknüpfung mit irrelevanter Information (Thompson-Schill, D'Esposito et al. 1997; Thompson-Schill, Aguirre et al. 1999). Ein Übersichtsartikel von Bookheimer fasst die Talairach-Koordinaten und die Aktivierungen der wichtigsten Sprachstudien zusammen.

Der direkte Vergleich der erwähnten Studien mit dem frontalen Aktivierungsmuster der Kohärenzbedingung (coh>incoh) verdeutlicht die Übereinstimmung der Aktivität im Bereich des vorderen IFG mit anderen Studien semantischer Entscheidungsaufgaben (s. Abb. 21: [Bookheimer 2002] vs. [coh>incoh]). Die Abbildung der Gesamtaktivierung (b) zeigt auch, dass die Gesamtaufgabe insgesamt auf einem größeren Netzwerk frontaler Sprachareale beruht. Die Daten der erwähnten Studien und die Ergebnisse des vorliegenden Experiments deuten darauf hin, dass der Gyrus frontalis inferior eine zentrale Rolle bei der Analyse semantischer Information spielt, wobei dem vorderen Anteil des IFG eine besondere Funktion bei der Koordination und Assoziation verschiedener Begriffe zukommt.



a) Bookheimer 2002 b) coh>incoh

Abb. 21: Vergleich der Hauptaktivierung des IFG mit Studien semantischer Aufgaben

In Bezug auf die konkrete Fragestellung, d.h. das implizite Erkennen von semantischer Kohärenz gibt es kaum vergleichbare Studien. Mit dem vorliegenden Experiment verwandt ist eine fMRI-Studie von Ferstl und v. Cramon, in der die Beurteilung der semantischen Kohärenz von Sätzen untersucht wurde. Dabei sollten die Probanden beurteilen, ob zwei Sätze sinnvoll zusammenhängen oder nicht („Maria hatte Examen. Die Hände waren feucht“. vs. „Maria hatte Examen. Ihre Freunde dachten an ihren Geburtstag“). In Bezug auf den Kontrast der kohärenten vs. inkohärenten Urteile berichten die Autoren über eine Mehraktivierung im Bereich des vorderen Gyrus frontalis superior und hinteren Cingulum. Damit stimmt die Aktivierung im Bereich des oberen frontalen Gyrus grob mit den Ergebnissen des Vergleichs coh>incoh überein, kommt aber im Experiment von Ferstl weiter rostral zu liegen. Während das Erkennen semantischer Kohärenz im vorliegenden

Fall mit einer Aktivierung des vorderen Cingulum korreliert, berichten Ferstl und v. Cramon über eine Aktivierung des hinteren Cingulum. Auf eine Beteiligung des hinteren Cingulum deuten lediglich die Ergebnisse des expliziten Kohärenzerkennens hin (cohex>cohim, Zeitpunkt Response). Darüber, ob der Unterschied in den genannten Aktivierungen das Resultat der verschiedenen Fragestellungen oder Ausdruck der unterschiedlichen Auswertemethoden ist, lässt sich nur spekulieren. In Bezug auf die statistische Aussagekraft lässt sich im Vergleich zu Ferstl und v. Cramon ($z = 5{,}18$ und 3,42, unkorrigiert) festhalten, dass die z-Werte der vorliegenden Ergebnisse ($z = 5{,}70$ bzw. 5,09) höher und für multiple Vergleiche korrigiert waren ($p < 0.05$). Angesichts der unterschiedlichen Aufgaben scheint es jedoch eher wahrscheinlich, dass die Unterschiede auf die unterschiedlichen Inhalte der jeweiligen Entscheidungen zurückzuführen sind. So wurden einmal Wörter, im anderen Fall Sätze verwandt. Der Unterschied in der frontalen Aktivierung könnte ferner darauf zurückzuführen sein, dass im Experiment von Ferstl eigentlich nicht die Kohärenz, sondern die kausale Verknüpfung von zwei Aussagen beurteilt wurde, während im vorliegenden Fall eher die globale inhaltliche Assoziation der Begriffe beurteilt werden sollte. Es könnte also sein, dass die Interpretation von Kausalzusammenhängen eher frontopolar, die von allgemeinen Sinnzusammenhängen eher frontomedial vermittelt wird. Darauf aufbauend liesse sich eine Hierarchie der beiden frontalen Funktionen postulieren, in dem Sinne, dass posterior eher die allgemeine Assoziation der dargebotenen Information und nachfolgend frontal deren kausaler Zusammenhang evaluiert wird.

Im zeitlichen Verlauf sieht man deutlich, dass über alle Bedingungen hinweg zunächst die linksseitige Analyse dominiert, während bei der Suche nach einer Antwort (Zeitpunkte R und RP) eine ausgeprägte Aktivierung des rechten IFG hinzukommt, die im Falle des Gesamtkontrastes sogar die linksseitige Aktivierung übersteigt.

In Bezug auf die sprachspezifische Spezialisierung der Hemisphären gibt es zahlreiche Studien. Während die linke Hemisphäre eher auf die phonologischen, syntaktischen und semantischen Aspekte spezialisiert ist, d.h. die sprachliche Primäranalyse im wörtlichen Sinn, scheint die rechte Hemisphäre eher assoziative Sprachaspekte wahrzunehmen und zu verarbeiten (Bookheimer 2002). So gibt es Studien die zeigen, dass das Verständnis von metaphorischen Ausdrücken und Sprichwörtern auf rechtsfrontaler Aktivierung beruht, genauso wie die kontextuelle Interpretation und Einordnung von Begriffen (Winner and

Gardner 1977; Van Lancker 1990; Bottini, Corcoran et al. 1994). Kircher et al. berichten über ein Experiment, in dem Versuchspersonen Wörter generieren sollten, die sich entweder auf ein semantisches Schlüsselwort [Hund – ".." (Bellen)] oder auf einen Schlüsselsatz [Das Wetter heutzutage ist ".."] bezogen. Während die Wortbedingung in der bereits zuvor gezeigten linksfrontalen Aktivierung resultierte, zeigte sich in der Satzbedingung eine rechtsseitige temporale Aktivierung (Kircher, Brammer et al. 2001). Bei St. George wurden Sätze gezeigt, die ohne Hintergrundinformation schwer einzuordnen, mit einer entsprechenden Überschrift jedoch leicht verständlich waren. In der Bedingung mit Überschrift zeigte sich eine Aktivierung in den bekannten fronttemporalen Sprachareale der linken Seite. In der Bedingung ohne Überschrift, in der also eine kontextuelle Einordnung notwendig war um den Sinn zu verstehen, zeigte sich eine deutliche rechtstemporale Aktivierung (St George, Kutas et al. 1999). Der Vergleich der Beurteilung von logischer oder kontextueller Verknüpfung von Sätzen ergab ebenfalls eine rechtsfrontale Aktivierung für die kontextabhängige Fragestellung (Caplan and Dapretto 2001). Auch die Interpretation von Sprachmelodie und emotionalen Konnotationen scheint eher rechtsseitig stattzufinden. In einem Experiment von Buchanan sollten 4 Worte entweder nach bestimmten Phonemen oder ihrem emotionalen Gehalt analysiert werden. Wiederum korrelierte die prosodische Fragestellung mit einer signifikanten Mehraktivierung des rechten IFG und parietalen Kortex (Buchanan, Lutz et al. 2000).

In Bezug auf das durchgeführte Experiment bleibt also festzuhalten, dass die Beurteilung der semantischen Kohärenz von Wörtern auf einem beidseitigen, linksbetonten frontalen Netzwerk aus frontomedianen (prä-SMA) frontolateralen (IFG) Arealen beruht, wobei die sprachliche Analyse der einzelnen Begriffe eher linksseitig abzulaufen scheint, während die Suche nach einem gemeinsamen Lösungswort eine rechtsseitige Betonung zeigt und offensichtlich über den prä-supplementär motorischen Kortex vermittelt wird.

Prä-supplementär motorischer Kortex (prä-SMA)

Der direkte Vergleich der kohärenten und inkohärenten Antworten [(cohim+cohex)>incoh)] zeigt, dass die Aktivierung des frontomedialen präfrontalen Kortex und rechten Kleinhirns mit der Wahrnehmung von Kohärenz korreliert, und zwar unabhängig davon, ob ein Lösungswort gefunden wurde, oder nicht (s. Abb. 8). In der Projektion der statistischen Daten auf das anatomische 3D-Mittelbild der teilnehmenden Probanden wird deutlich, dass

das frontomediale Aktivierungsmuster dem medialen Anteil des Gyrus frontalis superior (BA 6) zugeordnet werden kann, der als prä-supplementär motorischer Kortex (prä-SMA) bezeichnet wird.

Die Beteiligung des prä-SMA bei der Ausführung motorischer Aufgaben ist länger bekannt (Cunnington, Windischberger et al. 2002). Neuere Studien weisen darauf hin, dass der prä-supplementär motorische Kortex ganz allgemein für die Koordination verschiedener Informationen zuständig sein könnte. Die Vermutung, dass der prä-SMA primär für die Ausführung selbstgenerierter Bewegungen zuständig ist, während der dorsolaterale prämotorische Kortex eher durch externe Reize getriggerte Bewegungen ausführt, konnte in funktionellen Kernspinexperimenten nicht bestätigt werden. Allerdings erfolgte die Aktivierung des prä-SMA in der selbstgenerierten Bedingung signifikant vor der von außen getriggerten Bedingung, was als Hinweis auf eine generelle Funktion des SMA bei der Vorbereitung und Koordination von Bewegungen interpretiert wird (Cunnington, Windischberger et al. 2002).

Eine Metaanalyse von 11 PET-Studien über das Lesen einzelner Wörter ergab eine eindeutige Übereinstimmung der beobachteten Aktivierungen im Bereich der beidseitigen motorischen und superior temporalen Kortices, des prä-SMA, linken Gyrus fusiformis und des Cerebellum (Turkeltaub, Eden et al. 2002), so dass eine generelle Beteiligung des prä-SMA an sprachlichen Aufgaben angenommen werden kann. In einem Experiment zeigte sich eine relative medial-laterale Verlagerung der Aktivierung vom prä-SMA zu den lateral gelegenen Sprachareale im Bereich des unteren Gyrus frontalis, je nachdem, ob Wörter frei generiert wurden, oder die Nennung nach äußeren Vorgaben erfolgte (Crosson, Sadek et al. 2001). Diese Beobachtung passt zur Aktivierung des prä-SMA im vorliegenden Experiment, bei der das Lösungswort ebenfalls selbst generiert wurde. Ob die Aktivierung eher den artikulatorischen Anforderungen oder der eigentlichen Sprachproduktion zugeordnet werden kann, wird diskutiert.

Hanakawa et al. haben drei nichtmotorische Aufgaben verglichen, die rechnerische (Addition), sprachliche (Wochentage aufzählen) und räumliche Fragestellungen (Lokalisation einer Position anhand von Anweisungen) umfassten. Der direkte Vergleich aller drei Aufgaben ergab eine übereinstimmende Aktivierung des dorsolateralen

präfrontalen Kortex, die prä-supplementär motorische und dorsolateral prämotorische Areale umfasste, sowie eine signifikante Aktivierung im hinteren parietalen Kortex und der Kleinhirnhemisphären. Obwohl die Aufgaben im Stillen bearbeitet wurden und zur Beantwortung keinerlei motorische Aktivität erforderlich war, zeigte sich eine deutliche Aktivierung in einem Bereich des dorsolateralen prämotorischen Kortex (Hanakawa, Honda et al. 2002). Man kann also vermuten, dass die entsprechenden prämotorischen Areale entweder bereits durch Operationen, die potentiell eine komplexe Antwort oder Handlung erfordern, mitaktiviert werden, oder dass sie ganz allgemein für die exekutive Koordination sowohl motorischer, als auch abstrakter Inhalte zuständig sind.

Die Annahme einer koordinativen Funktion wird durch eine Studie von Rushworth et al. gestützt, die die neuronale Aktivierung beim Aufgaben- und Paradigmenwechsel untersucht haben. In einem einfachen Reaktionsexperiment haben sie entweder die Vorgabe der Entscheidungsregeln (RP = response switching), oder der Stimuluskriterien (VP = visual switching) geändert. Dabei kam es in beiden Fällen zu einer frontomedianen Aktivierung, die unmittelbar an die Änderung der Versuchsbedingung gekoppelt war. Dabei korrelierte RP mit einer Aktivierung des prä-SMA, sowie des rostralen und caudalen Cingulum, VS mit einer alleinigen Aktivierung eines Areals am Übergang zwischen SMA und prä-SMA (Rushworth, Hadland et al. 2002). Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass konkurrierende afferente Information eher im hinteren Teil, konkurrierende efferente Signale eher im vorderen Teil des prä-SMA prozessiert werden. Auf eine funktionelle Dichotomie des frontomedianen Kortex in eine posterior lokalisierte Integration externer Stimuli (prä-SMA) und anteriore Koordination interner Reize (anteriores Cingulum) weisen auch elektrophysiologische Experimente an Affen hin, die zeigen, dass die Neuronen des prä-SMA in erster Linie auf die Präsentation verschiedener Stimuli reagieren, während Neurone des vorderen Cingulum eher in Bezug auf Aspekte des Erfolgs und der Belohnung reagieren (Akkal, Bioulac et al. 2002).
In Bezug auf den abschätzenden Charakter der Beurteilung ist zuletzt eine Studie von Osherson et al. zu erwähnen, die wahrscheinlichkeitsorientierte abschätzende Entscheidungen und rein regelbasierte Entscheidungen verglichen haben. Dabei resultierte der direkte Vergleich der wahrscheinlichkeitsorientierten und deduktiven Bedingung in einer relativen Mehraktivierung des linken Gyrus frontalis medius und des Gyrus frontalis superior (BA 8, angrenzend zum prä-SMA BA 6) für die abschätzenden Entscheidungen.

Gyrus cinguli anterior

Die zeitliche Analyse der frontomedianen Aktivierung zeigt eine deutliche posterior-anteriore Verlagerung vom hinteren Anteil des prä-SMA zum Zeitpunkt der Analyse hin zum vorderen Gyrus cinguli zum Zeitpunkt der expliziten Antwort.

Dem vorderen cingulären Kortex (AC) wird allgemein eine zentrale Rolle bei der Koordination und Auswahl konkurrierender Information und Handlungsentwürfe zugeschrieben (Awh and Gehring 1999; Krawczyk 2002; van Veen and Carter 2002). Im AC findet sich eine Klasse von spindelförmigen Neuronen, die nur bei Menschenaffen vorkommen und mit ihren weitreichenden kortikalen Verbindungen als neuronale Schaltstelle für die Koordination und Verknüpfung verschiedener Inhalte und Handlungsoptionen postuliert werden. Es wird vermutet, dass die ausgeprägte postnatale Plastizität der cingulären Verschaltung das Resultat gelernter Verknüpfungsmuster und Problemlösungskompetenzen sein könnte (Allman, Hakeem et al. 2001). Zahlreiche elektrophysiologische Studien an Affen und Ratten weisen auf eine zentrale Rolle des AC beim Lernen assoziativer Verknüpfungen, vor allem von Handlung und Belohnung und der daraus resultierenden Belohnungserwartung hin (Takenouchi, Nishijo et al. 1999; Bush, Vogt et al. 2002; Shidara and Richmond 2002; Walton, Bannerman et al. 2002; Hadland, Rushworth et al. 2003). Welche Bedeutung die funktionierende Verknüpfung kognitiver und emotionaler Inhalte für ein intaktes Sozialverhalten hat, zeigen Studien an Makaken, die nach einer gezielten Schädigung des AC durch eine Abnahme ihrer sozialen Interaktionen und gezielte Vorliebe für unbelebte Objekte auffielen (Hadland, Rushworth et al. 2003).

Alltägliche verhaltensrelevante Entscheidungen sind in der Regel hypothesengeleitet, d.h. beruhen auf der impliziten oder expliziten Annahme der entsprechenden Konsequenz einer bestimmten Entscheidung bzw. Handlung. In einem PET-Experiment haben Elliott und Dolan die neuronalen Mechanismen der Entwicklung einer Hypothese und der Exekution einer dementsprechenden Antwort untersucht (Elliott and Dolan 1998). Gesunden Probanden wurde eine zufällige Abfolge verschiedener, eigentlich nicht zusammenhängender Paare von Schachbrettmustern gezeigt, die angeblich einer gewissen Ordnung folgten. Die Teilnehmer wurden instruiert, die Strategie der vermeintlich richtigen Anordnung zu finden und daraufhin zu entscheiden, welches der gezeigten Muster richtig

sei. Die Versuchsanordnung wurde hinsichtlich der Hypothesen- und Entscheidungsaufforderung variiert, wobei sich folgendes Muster ergab: Die Hypothesenbedingung resultierte in einer signifikanten Steigerung des zerebralen Blutflusses im Bereich des linken vorderen Cingulum und rechten Kleinhirns. Die Entscheidungsbedingung resultierte ebenfalls in einer Aktivierung des vorderen cingulären Kortex, jedoch weiter rostral (BA 32/24), sowie des vorderen lateralen orbitofrontalen Kortex (BA 11) der rechten Seite. Das Aktivierungsmuster der Hypothesenbedingung ähnelt stark den Ergebnissen der Kohärenzbedingung, die ebenfalls von einer frontomedianen und cerebellären Aktivierung beherrscht wird. Im Gegensatz zu der Hypothesenbedingung bei Elliott zeichnet sich die frontomediane Aktivierung beim Kohärenzerkennen jedoch weiter dorsal und superior im Bereich des prä-supplementärmotorischen Kortex ab.

In den unkorrigierten Kontrasten scheint die frontomediane Aktivierung fliessend vom Gyrus frontalis in den vorderen Gyrus cinguli überzugehen, so dass eine genaue Differenzierung schwierig ist. Die zeitliche Analyse der frontomedianen Aktivierung (siehe task>baseline und cohim>baseline) zeigt jedoch eine dorsal/posterior-ventral/anteriore Verlagerung des frontalen Aktivierungsmusters. Während die Aktivierung des Gyrus frontalis superior bereits während der Analyse des Wortmaterials auftritt, korreliert die Aktivierung des vorderen Cingulum eindeutig mit dem Antwortzeitpunkt, also der eigentlichen Entscheidung. In Bezug auf die Ergebnisse von Elliott und Dolan könnte man also argumentieren, dass das prä-SMA eher für die Analyse der semantischen Assoziation der Begriffe und deren Kohärenz zuständig ist, während die Entscheidung und Auswahl der generierten Optionen im vorderen Cingulum erfolgt.

Auf die Rolle des vorderen cingulären Kortex bei der Koordination und Selektion konkurrierender Antworten fokussiert eine Studie von Dreher und Grafman, die die Aktivierung bei der gleichzeitigen und sukzessiven Durchführung einer Aufgabe verglichen haben. In einer einfachen Aufgabe sollten Buchstaben nach Groß- und Kleinschreibung bzw. Vokalen und Konsonanten eingeteilt werden, wobei die Fragen entweder gleichzeitig oder nacheinander beantwortet werden sollten. Die Aufgaben als solche resultierten unabhängig von der Reihenfolge in der Aktivierung eines präfrontal-parietalen Netzwerkes, die gleichzeitige Durchführung beider Aufgaben in einer zusätzlichen Aktivierung des

rostralen vorderen Cingulum, was dessen Rolle beim Management konkurrierender Antworten oder Inhalte untermauert (Dreher and Grafman 2003).

4.1.2 Implizites Erkennen

Obwohl keine explizite Lösung gefunden werden konnte, zeigt die implizite Bedingung (cohim>baseline) im wesentlichen das gleiche bereits in der Gesamtaufgabe (task-baseline) beschriebene frontale Aktivierungsmuster.

Untersucht man, in wieweit sich die implizite Bedingung von den beiden anderen Testbedingungen unterscheidet [cohim-(cohex+incoh)], findet sich eine leichte Mehraktivierung des prä-SMA und linken IFG, sowie eine zusätzliche Aktivität frontopolar links, des rechten Sulcus temporalis superior und parietaler Areale beider Seiten. In einer Gegenüberstellung der impliziten und expliziten, sowie impliziten und inkohärenten Bedingung wurde versucht, das implizite Aktivierungsmuster weiter zu differenzieren. Da bei der expliziten Bedingung nicht klar zu unterscheiden ist, in wieweit die Aktivierung auf das Erkennen von Kohärenz, oder das Finden eines Lösungswortes zurückzuführen ist, ist der direkte Vergleich der impliziten und inkohärenten Bedingung (cohim-incoh) von besonderem Interesse, da hier in beiden Fällen kein Wort angegeben werden konnte, in einem Fall jedoch das Gefühl einer gewissen Kohärenz empfunden wurde, im anderen Fall nicht. Obwohl die Bedingungen also auf der rein artikulatorischen Ebene identisch waren, zeigt sich in der direkten Gegenüberstellung eine eindeutige Aktivierung des beschriebenen frontalen Netzwerkes (prä-SMA und Gyrus frontalis inferior beidseits), Kleinhirns (Vermis und rechte Hemisphäre), sowie des hinteren oberen parietalen Kortex und Sulcus temporalis superior der rechten Seite. Während sich die frontale Aktivierung eindeutig auf das Erkennen von Kohärenz zurückführen lässt (cohim-incoh), zeigt der Vergleich zur expliziten Bedingung (cohim>cohex), dass die Mehraktivierung des Sulcus temporalis superior und der parietalen Areale mit der Implizität der Entscheidung korreliert. Es bleibt also festzuhalten, dass:

1) das implizite Erkennen von Kohärenz auf den gleichen Mechanismen beruht, wie das explizite, diese jedoch offensichtlich nicht ausreichen, den Zusammenhang explizit zu erkennen.

2) das Erkennen von semantischer Kohärenz über ein frontales Netzwerk aus prä-SMA und IFG vermittelt wird.

3) die Implizität des Erkennens mit einer Aktivierung temporo-parietaler Areale korreliert.

Die Bedeutung des prä-SMA für das Erkennen semantischer Kohärenz wurde bereits im Rahmen der Gesamtaufgabe diskutiert und wird durch die implizite Bedingung bestätigt. Dass das Kleinhirn auch in der impliziten Bedingung aktiv war, obwohl hier keine explizite Antwort gegeben wurde, deutet darauf hin, dass die cerebelläre Aktivierung tatsächlich im Zusammenhang mit der sprachlichen Analyse gesehen werden muss, da in der impliziten Bedingung eigentlich kein artikulatorischer Unterschied zur Kontrollbedingung bestand. Dass die Aktivierung dennoch mit dem Antwortzeitpunkt korreliert, könnte jedoch auch dahingehend interpretiert werden, dass gerade weil noch kein Lösungswort gefunden werden konnte, verstärkt eine Erklärung gesucht wurde und so bereits die Erwartung einer möglichen Lösung in einer bereitstellenden Aktivierung der entsprechenden artikulatorischen Areale resultierte.

Sulcus temporalis superior (STS)

Eine Aktivierung des STS wurde in Experimenten verschiedener Modalitäten beschrieben, so dass der STS auch dem polymodalen Assoziationskortex zugerechnet wird (Calvert 2001).
In einer Untersuchung der mentalen Repräsentation von Objekten fanden Ishai et al. eine überlappende Aktivierung im Bereich des STS für verschiedene Objekte, die ansonsten in unterschiedlichen, in erster Linie temporalen Arealen lokalisiert waren (Ishai, Ungerleider et al. 1999; Ishai, Ungerleider et al. 2000). Experimente mit fMRT zeigen, dass die crossmodale Verarbeitung, insbesondere die Integration auditiver und visueller Information mit einer Aktivierung des superior temporalen und inferior parietalen Sulcus, der Insel, und verschiedenen frontalen Herden korreliert, unter anderem auch des ventromedialen präfrontalen Kortex (Calvert, Campbell et al. 2000; Calvert, Hansen et al. 2001). Bei der Verknüpfung von Information verschiedener Modalitäten könnten dem STS seine ausgeprägten transkortikalen Verknüpfungen zugute kommen. Von anatomischen Studien an Rhesusaffen weiß man, dass der Sulcus temporalis ausgedehnte Verbindung zu verschiedenen Arealen des präfrontalen Kortex und parietalen Kortex aufweist (Seltzer and Pandya 1989; Seltzer and Pandya 1994). In Tracer-Studien wurden direkte Verbindungen zum lateralen und medialen präfontalen Kortex, sowie zu Arealen des unteren

Parietallappens beschrieben, welche ein Korrelat der beschriebenen Verknüpfungfunktion darstellen könnten.
Daneben gibt es zahlreiche Studien, die auf eine Rolle des STS bei der Interpretation und Nachahmung von Ausdrucksbewegungen hinweisen. So zeigen Experimente mit menschlichen Primaten, dass der STS nicht nur auf Bewegungen von Augen, Mund und Händen reagiert, sondern auch auf statische Bilder von Gesichtern und Körperteilen, die im weiteren Sinne an Ausdrucksbewegungen beteiligt sind (Allison, Puce et al. 2000). Iacoboni et al. berichten über ein Areal im STS, das an der Imitation von Bewegungen beteiligt ist und vermuten einen Zusammenhang der beobachteten Aktivierung mit dem Abgleich der visuellen Information und der motorischen Reafferenz-Kopie (Iacoboni, Koski et al. 2001). So könnte es also verschiedene, für unterschiedliche Verknüpfungen zuständige, polymodale Assoziationsareale geben, welche mit den unterschiedlichen histologischen Abschnitten des STS korrelieren (Seltzer and Pandya 1989).

Andere Studien haben die Rolle des STS bei der Interpretation emotionaler Stimuli und Simulation mentaler Inhalte untersucht. In einer fMRT-Studie über die Wahrnehmung von Gesichtsausdrücken zeigte sich neben einer beidseitigen Aktivierung des Sulcus intraparietalis und Gyrus fusiformis, eine Mehraktivierung des rechten STS, die spezifisch mit emotionalen Gesichtsausdrücken korrelierte (Narumoto, Okada et al. 2001). Castelli et al. haben die Beobachtung von Heider und Simmel aufgegriffen, die beobachtet hatten, dass selbst einfachen bewegten Objekten komplexe mentale Inhalte und Motivationen zugeschrieben werden (Heider and Simmel 1944; Castelli, Happe et al. 2000). Die Autoren haben eine ähnliche Aufgabe mit PET untersucht und 4 Areale gefunden, die mit der Zuschreibung mentaler Inhalte korrelierten: den medialen präfrontalen Kortex, Sulcus temporalis superior, basal temporale Regionen (Gyrus fusiformis und Temporalpol) und den extrastriatalen Kortex (Gyrus occipitalis). Weitere Studien mit diversen ToM-Aufgaben zeigen eine übereinstimmende Aktivierung des medialen präfrontalen Kortex, Sulcus temporalis superior und der temporalen Pole beider Seiten (Frith and Frith 2003). Dabei zeigen Experimente mit kombinierten Aufgaben, dass der mediale präfrontale Kortex sowohl an der Interpretation mentaler Zustände als auch an der Beurteilung der Kohärenz sprachlicher Information beteiligt ist, was die vorliegende Aktivierung bestätigt und auf eine kontextunabhängige Funktion hinweist (Ferstl and von Cramon 2002).

Dass die implizite Bedingung mit dem STS ein Areal aktiviert, dass neben dem impliziten Erkennen von semantischer Kohärenz, das ja als Modell für intuitive Prozesse dienen sollte, offensichtlich auch für die „intuitive“ Interpretation von Ausdrucksbewegungen und die Zuschreibung mentaler Zustände zuständig ist, kann als Bestätigung der in der Einleitung vorgestellten Annahme interpretiert werden, dass Intuition im allgemeinen Sinn lediglich die Summe verschiedener impliziter Prozesse darstellt. Auf Basis seiner multisensorischen Verschaltung könnte der STS die Schaltzentrale eines allgemeinen Mustererkennungs-mechanismus darstellen, der komplexe polymodale Informationen nach höhergradigen Mustern analysiert. Eine derartige polymodale Mustererkennungsfunktion könnte erklären, warum der STS sowohl an der impliziten Analyse semantischer Zusammenhänge, als auch der impliziten Interpretation komplexer Interaktionsmuster beteiligt ist. Auf eine allgemeine Verknüpfungsfunktion weisen auch die Ergebnisse einer Studie von Blakemore et al. hin, in der die Kausalität von einfachen graphisch dargestellten Ereignissen beurteilt werden sollte. Neben einer Aktivierung von temporalen Arealen führte die Bedingung, in der zwei Ereignisse kausal zusammenhingen, zu einer Mehraktivierung des linken intraparietalen Sulucs und des STS beider Seiten (Blakemore, Fonlupt et al. 2001).

Parietaler Kortex

Im zeitlichen Verlauf der parietalen Aktivierung lassen sich drei Herde unterscheiden. Während der Analyse der Triaden (Zeitpunkte S und SP) sind zunächst zwei Areale im oberen und unteren linken parietalen Kortex aktiv. Diese linksparietale Aktivierung lässt im weiteren Verlauf nach und wird von einer Aktivierung im Bereich des unteren Parietallappens der rechten Seite abgelöst, die zum Antwortzeitpunkt auftritt und bis zum Schluss der Aufgabe persisiert (RP-RP2).

Neuere bildgebende Studien mit PET und fMRT bestätigen die Resultate von elektrophysiologischen Studien an nicht-menschlichen Primaten, die darauf hinweisen, dass der parietale Kortex aus einer Reihe spezialisierter Untereinheiten besteht, die verschiedenste visuomotorische, aufmerksamkeitsbezogene und räumliche Aufgaben wahrnehmen und unter dem Überbegriff des parietalen Assoziationskortex zusammengefasst werden. Eine parietale Beteiligung wird bei einer Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben berichtet, die motorische Anforderungen, räumliches Sehen, räumliche Operationen, mentale Vorstellungen komplexer Objekte, crossmodale

Objekterkennung, Rechenoperationen, schnelle Aufgabenwechsel, sowie Funktionen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnis umfassen (Culham and Kanwisher 2001). Warum, oder besser wie der parietale Kortex derart unterschiedliche Funktionen wahrnimmt, ist unklar.

Fromisano et al. haben die zeitliche Abfolge der Aktivierung einer räumlichen Vorstellungsaufgabe untersucht, bei welcher der Winkel zwischen den Zeigern einer vorgestellten Uhr beurteilt werden sollte (Formisano, Linden et al. 2002). Neben Aktivierungen im dorsolateralen präfrontalen, motorischen und supplementär-motorischen Kortex fanden sie eine ausgeprägte bilaterale posterior-parietale Aktivierung. Die zeitliche Analyse ergab eine klare Abfolge der beteiligten Herde, wobei der linke parietale Kortex eindeutig vor dem rechten aktiv war, was die Autoren dahingehend interpretierten, dass linksseitig zunächst die Vorstellung der Objekte erfolgt, während die eigentliche Analyse und Beurteilung auf der rechten Seite passiert. Die Ergebnisse beziehen sich auf eine spezielle räumliche Aufgabe und sind somit nur bedingt auf das vorliegende Experiment übertragbar. Angesichts der funktionellen Heterogenität des parietalen Kortex passt die Annahme einer linksseitig lokalisierten Vorstellungsfunktion und rechtsseitigen Analysefunktion jedoch gut mit der im vorliegenden Experiment beobachteten Reihenfolge der parietalen Aktivierung zusammen. In diesem Sinne würde also die frühe hochparietale Aktivierung im Bereich des linken Gyrus postcentalis der Vorstellung und Visualisierung der genannten Begriffe entsprechen, die vermutlich umso ausgeprägter ist, wenn ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen den Begriffen wahrgenommen wird, jedoch noch nicht verbalisiert werden kann. Dahingegen würde die rechtsseitige parietale Aktivierung, die in zeitlicher Koinzidenz mit dem STS auftritt, der Analyse und Beurteilung der generierten Information entsprechen. Für diese Annahme sprechen auch die Ergebnisse einer fMRT-Studie, in der Objektbeschreibungen nach unterschiedlichen Kriterien kategorisiert werden sollten, entweder nach einer vorgegebenen Regel, oder nach allgemeiner Ähnlichkeit. Dabei zeigte sich eine eindeutige Korrelation der ähnlichkeits-basierten Bedingung mit der Aktivierung des rechten unteren Parietallappens (Grossman, Smith et al. 2002), was in Zusammenschau mit den vorgelegten Ergebnissen darauf hinweist, dass der rechte parietale Kortex, zusammen mit dem Sulcus temporalis superior, eine zentrale Rolle für die ähnlichkeitsbasierte Evaluation komplexer heteromodaler Information spielt.

Neben den bereits diskutierten Sprachareale zeigen Untersuchungen der Wortverarbeitung und semantischer Aufgaben auch eine Aktivierung des linken unteren Parietallappens (IPL), was auf eine Beteiligung des IPL an der primären Sprachverarbeitung hinweist (Newman and Twieg 2001). Dabei deuten Studien über das Lernen und Wiedererkennen von Wörtern darauf hin, dass der IPL vor allem am Wiederkennen von Wörtern beteiligt ist (McDermott, Ojemann et al. 1999; Jessen, Flacke et al. 2001). Ein direkter Hinweis auf die Beteiligung des parietalen Kortex bei der Analyse von semantischen Assoziationen ergibt sich aus einer MEG-Studie über die neuronale Verarbeitung von assoziativen Wörtern, die eine hochsignifikante Korrelation der parieto-occipitalen Aktivierung mit der Assoziationsstärke der Begriffe ergab (Pulvermuller, Assadollahi et al. 2001). Hinweise über die Verknüpfung der an komplexen sprachlichen Prozessen beteiligten Areale ergeben sich aus den Arbeiten von Ivanitsky et al., die die funktionelle Konnektivität von durch Wortassoziationen ausgelösten evozierten Potentialen modelliert haben und eine Korrelation von linksfrontalen und linksparietalen Arealen beschreiben (Ivanitsky, Nikolaev et al. 2001; Nikolaev, Ivanitskii et al. 2001). Berichte über eine Beteiligung des IPL bei auditorischen und visuellen Aufgaben, Wortverarbeitung, semantischen Fragestellungen, sowie beim Lippenlesen untermauern die polymodale Funktion des IPL (Demonet, Chollet et al. 1992; Vandenberghe, Price et al. 1996; Nishitani, Nagamine et al. 1998; Paulesu, Perani et al. 2003).

Ähnlich dem STS wird auch der inferiore parietale Kortex im Zusammenhang mit ToM-Aufgaben erwähnt. In einem Experiment über die Beurteilung der Urheberschaft von Bewegungen zeigte sich eine signifikante Aktivierung des IPL immer dann, wenn die Ursache einer Bewegung einer dritten Person zugeschrieben wurde. Dahingegen resultierte die Annahme, selbst Urheber der beobachteten Bewegung zu sein, in einer Aktivierung der vorderen Insel (Farrer and Frith 2002; Farrer, Franck et al. 2003). Eine Aktivierung des rechten IPL zeigte sich unter anderem in einer Studie über empathische Anteilnahme an emotionalen Geschichten dritter Personen (Decety and Chaminade 2003). Auch die Beteiligung an der Analyse gestischer Bewegungen könnte im Zusammenhang mit der impliziten Wahrnehmung sozialer Stimuli stehen (Hermsdorfer, Goldenberg et al. 2001).
In Bezug auf das Gefühl, etwas zu Erkennen, ist eine Studie von Kikyo et al. zu erwähnen, die das Gefühl des „ein Wort auf der Zunge Liegens“ mit fMRT untersucht haben. Dabei wurden die Probanden nach dem Namen mittelmäßig bekannten Personen gefragt, was in

einem Teil der Fälle das typische Gefühl hervorrief, als wüsste man zwar den Namen der entsprechenden Person, komme aber im Moment nicht darauf. Dieses Zwischenstadium, das sog. „feeling-of-knowing", resultierte in einer unregelmäßigen Aktivierung verschiedenster kortikaler Areale, was zunächst als Suchfunktion verschiedener assoziativer Areale interpretiert wurde. Das erfolgreiche Auffinden des gesuchten Namens hingegen führte zu einer signifikanten Aktivierung des linken dorsolateralen präfrontalen und vorderen cingulären Kortex, was mit dem expliziten Erkennen von Kohärenz übereinstimmt, bei dem ebenfalls dorsolaterale Areale und das vordere Cingulum aktiviert wurden (Kikyo, Ohki et al. 2001). Maril et al. haben versucht, „feeling-of-knowing" in einem parametrischen Design zu operationalisieren, bei dem Wortpaare gelernt werden sollten. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde jeweils eines der gelernten Worte gezeigt und die Probanden gefragt, ob sie das dazugehörige Partnerwort noch wissen (K), das Gefühl haben, es wiedererkennen zu würden (FOK), oder es nicht mehr wissen (DK). Im Vergleich K>FOK>DK zeigte sich eine parametrische Zunahme der Aktivierung des linksseitigen präfrontalen (medial superior/ACC und lateral inferior) und parietalen Kortex (Maril, Simons et al. 2003). Die Ergebnisse stimmten mit einem ähnlichen Experiment von Kikyo et al. überein, die ebenfalls über eine FOK-abhängige Zunahme der Aktivierung im medialen präfrontalen, links anterioren und dorsolateralen, sowie beidseitig lateralen präfrontalen Kortex berichten (Kikyo, Ohki et al. 2002). Die Aktivierung im Bereich der inferioren frontalen Gyri korrelierte dabei nicht mit dem erfolgreichen Wiederfinden der gesuchten Information, was die Beobachtung bestätigt, dass die lateralen Sprachareale vorwiegend an der Primäranalyse der entsprechenden Information beteiligt sind, während der frontomediale Kortex eher für die Beurteilung und Koordination der entsprechenden Inhalte zuständig scheint.

Auf eine Beteiligung des IPL bei der assoziativen Evaluation komplexer Information weisen die Ergebnisse von Untersuchungen über das Abschätzen von Ereignissen hin. In einer Studie sollte die Farbe, bzw. Zahl von Spielkarten geraten werden. Neben einer Aktivierung des Thalamus, ventromedialen präfrontalen Kortex und vorderen Cingulum, korrelierte die Ratebedingung auch mit einer Mehraktvierung des inferioren parietalen Kortex beider Seiten (Elliott, Rees et al. 1999). In einem anderen Experiment sollte das Auftreten eines Ereignisses vorausgesagt werden (Ein Auto in einer Szene), was mit einer Mehraktivierung präfrontaler und superior parietaler Areale, des inferioren parietalen

Kortex, der rechten Insel und des Thalamus korrelierte. Eine nähere Analyse des Antwortverhaltens zeigte zudem, dass sich die parietale und temporale Aktivierung verschiedenen Voraussagestrategien zuordnen ließ (Paulus, Hozack et al. 2001).

In der Zusammenschau der vorliegenden Ergebnisse und erwähnten Studien lässt sich also festhalten, dass das implizite Erkennen von Zusammenhängen auf einer funktionellen Mehraktivierung eines heteromodalen Netzwerkes beruht, das beidseitige parietale Areale, sowie den rechten Sulcus temporalis superior umfasst. Dieses Netzwerk könnte einem grundlegenden Mustererkennungsprozess entsprechen, in dem Informationen unterschiedlicher Modalitäten nach Ähnlichkeitskriterien untersucht werden. Während die Präsentation der multimodalen Assoziationen vermutlich im linken Lobus parietalis inferior passiert, könnte die Analyse und Ähnlichkeitsbeurteilung der präsentierten Information über den rechten temporoparietalen Kortex vermittelt werden, wo die Informationen im STS verknüpft werden.

Diskussion im Kontext der psychologischen Intuitionsmodelle

Basierend auf der Beobachtung, dass die Kohärenz von Information bereits wahrgenommen werden kann, ohne dass eine explizite Lösung verfügbar ist, haben Bowers und Regehr das erwähnte assoziative Konzept von Intuition vorgeschlagen (Bowers, Regehr et al. 1990). In Bezug auf reale lebensweltliche Probleme unterscheiden sie zwei Stadien des Problemlösens, erstens die Entdeckung relevanter Zusammenhänge und zweitens deren Überprüfung und Verifikation. In der Phase des Entdeckens, der eigentlichen intuitiven Phase, werden zunächst kontextuell relevante Informationen extrahiert und von diesen ausgehend mögliche Hypothesen generiert. Die Autoren gehen davon aus, dass der Entdeckungsprozess auf einer automatischen bottom-up Aktivierung semantischer Netzwerke basiert (Collins and Loftus 1975), die dem Gefühl des „Gemachten“ intuitiver Prozesse entspricht. Die aus dem intuitiven Wahrnehmungsprozess heraus generierten Hypothesen dienen als Startannahme und werden je nach Risiko und zur Verfügung stehender Zeit in nachfolgenden bewussten Schritten überprüft und modifiziert.

Die vorliegenden Ergebnisse scheinen die Vorstellung, dass zunächst auf einer vorbewussten Ebene die Kohärenz von durch die dargebotene Information aktivierten semantischen Netzwerken wahrgenommen wird, zu bestätigen. Der Vergleich der

impliziten und expliziten Bedingung zeigt eine frühe Aktivierung parietaler assoziativer Areale, die der frontalen Aktivität, welche mit dem eigentlichen Erkennen von Kohärenz korreliert, vorausgeht. Dementsprechend liesse sich die frühe parietale Aktivierung im Sinne einer allgemeinen assoziativen Evaluation der Begriffe deuten, während die frontomediane Aktivierung, insbesondere des prä-supplementär motorischen Kortex, dem quantitativen Monitoring der Kohärenz der entsprechenden aktiven Netzwerke entsprechen würde. Diese Dichtomie einer posterior parietalen assoziativen Evalutionsfunktion und eines frontomedianen Kohärenzmonitoring mit nachfolgender Suche einer expliziten Lösung, lässt sich gut mit der allgemeinen Gliederung des Kortex in posteriore passive sensorische Prozesse und frontal gelegene exekutive Funktionen vereinbaren. Dass letztlich auch die zu Grunde liegende passive Evaluation der dargebotenen Information auf gelernten Vorannahmen, sprich im weiteren Sinne Gedächtnisinhalten beruht, bestätigten die parahippocampale Aktivierung und interindividuelle Bandbreite der generierten Lösungen.

Ein wichtiger Aspekt in Bezug auf den Einfluss von Emotionen auf intuitive Urteilsprozesse ergibt sich aus den Studien von Bolte und Goschke. Basierend auf den Untersuchungen von Kuhl und Gray et Isen, die beobachtet hatten, dass unterschiedliche Gefühlszustände offensichtlich mit verschiedenen kognitiven Grundmodi korrelieren, haben Bolte und Goschke den Einfluss von Emotionen auf das implizite Erkennen semantischer Kohärenz untersucht (Isen and Means 1983; Kuhl 1983; Gray 2001). Es ist bekannt, dass Probanden in positiver Stimmung zu eher ungewöhlichen Assoziationen tendieren (Isen, Johnson et al. 1985), eine bessere Leistung in kreativen Problemlösungs-Tests zeigen (Isen, Daubman et al. 1987) und mehr heuristische als analytische Entscheidungs-Strategien bevorzugen (Isen and Means 1983). Von diesen Beobachtungen ausgehend schlägt Kuhl vor, dass eine positive Stimmung einen eher „holistischen“ Verarbeitungmodus fördert, welcher zu einer weitreichenden Aktivierung semantischer Netze führt, die auch entfernte Assoziationen miteinbezieht, während negative Affekte einen eher „analytischen“ Verarbeitungsmodus begünstigen, der auf einer restriktiven, mehr „fokussierten“ Erregungssausbreitung beruht (Kuhl 2000). Auf Basis dieser Annahmen haben Bolte und Goschke den Einfluss von Emotionen auf die Wahrnehmung semantischer Kohärenz untersucht und jeweils die Hälfte von zuvor als „neutral“ getesteten Probanden in eine positive und negative Stimmung versetzt. Während bei den negativ gestimmten

Versuchspersonen im Vergleich zum Vorexperiment kein subliminaler Kohärenzerkennungseffekt mehr nachweisbar war und die nicht explizit gelösten Triaden mehr oder weniger zufällig beurteilt wurden, zeigte sich bei den positiv gestimmten Teilnehmern eine deutliche Zunahme der Rate implizit richtig erkannter Triaden, was die Autoren als Bestätigung des von Kuhl propagierten, durch positive Stimmung gebahnten holistischen Verarbeitungmodus interpretieren (Bolte, Goschke et al. 2003).

Zwar lassen sich die vorliegenden Ergebnisse mangels einer affektspezifischen Differenzierung der untersuchten Probanden nicht konkret nachvollziehen, die Differenz zwischen der Aktivierung parietaler und temporaler assoziativer Areale in der impliziten Bedingung und dem parahippokampalen Gyrus und frontalen Sprachareale in der expliziten Bedingung ist jedoch gut mit der Annahme Kuhls vereinbar. In wieweit die parahippocampale Aktivierung durch einen unterschiedlichen Verarbeitungsmodus oder den bloßen Erfolg des Auffindens eines gesuchten Lösungswortes bedingt ist, ist dabei nicht ohne weiteres zu klären. Angesichts des indentischen Versuchsablaufs in allen Bedingungen und der Tatsache, dass den Probanden zu Beginn der Aufgabe nicht bewusst war, ob sie eine explizite Lösung finden werden, ist jedoch davon auszugehen, dass beide Bedingungen zunächst auf ein und demselben assoziativen Evaluationsmechanismus beruhen. Dieser war jedoch im Falle der impliziten Bedingung, in der die Lösung offensichtlich nicht so eng mit den vorgegebenen Begriffen verknüpft war, ausgedehnter und resultierte so in einer Mehraktivierung der entsprechenden assoziativen Areale, während auf der Seite der expliziten Bedingung kein anderer Suchmechanismus, sondern lediglich stärker der zweite Aspekt der Aufgabe, nämlich das erfolgreiche Erkennen von Kohärenz und Auffinden des entsprechenden Lösungswortes zum Ausdruck kam.

Auf einen vom sprachlichen Kontext unabhängigen, grundlegenden Kohärenzerkennungs-mechanismus weisen die Ergebnisse der von Bowers und Regehr durchgeführten Untersuchungen mit Ojekten des Waterloo Gestalt Closure Task hin. Ähnlich wie beim DOT wurden auch hier von zwei stark fragmentierten Abbildungen überproportional häufig jene erkannt, die einen Gegenstand darstellen sollten, auch wenn dieser nicht explizit benannt werden konnte. Durch Wiederholung des vorliegenden Experiments mit Objekten, liesse sich also differenzieren, welche der beobachteten Aktivierungen letztlich auf den sprachlichen Inhalt der Aufgabe zurückzuführen ist, und welche sich ausschließlich durch

das kontextunabhängige Erkennen von Kohärenz erklären lässt. Insbesondere in Bezug auf die parietale Aktivierung und den rechten STS liesse sich auf diese Weise untersuchen, in wieweit die Aktivierung des parietalen Kortex von der Qualität des Stimulusmaterials abhängt und ob die Aufgabe des STS, wie postuliert, primär in einer crossmodalen Verknüpfung der Information besteht. Würde sich auch in der Objektbedingung die Aktivierung des prä-SMA bestätigen, hätte man zudem einen weiteren Hinweis auf eine kontextunabhängige Funktion des frontomedianen Kortex bei der allgemeinen Beurteilung der Kohärenz von Information.

4.1.3 Explizites Erkennen

In der Betrachtung der expliziten Bedingung imponieren zunächst die Aktivierungen des rechten Gyrus parahippocampalis, der Basalganglien und des vorderen linken IFG (BA 46). Während die Aktivierung des Gyrus parahippocampalis bereits zu Beginn der Aufgabe nachweisbar ist und auf eine Rolle bei der Suche nach einem möglichen Lösungswort hinweist, korreliert die Aktivität der Basalganglien und des vorderen IFG mit dem Zeitpunkt der Entscheidung bzw. expliziten Antwort, was auf einen Zusammenhang mit dem erfolgreichen Finden und Artikulieren des entsprechenden Lösungswortes hindeutet.

Gyrus parahippocampalis

Zahlreiche neuropsychologische und bildgebende Studien weisen auf eine zentrale Rolle des Gyrus parahippokampalis (GPH) beim deklarativen und assoziativen Gedächtnis hin (Eichenbaum 2000; Stark and Squire 2001). Funktionelle MRT-Experimente über das Lernen von Wörtern zeigen eine Beteiligung des parahippokampalen Gyrus (PHG), sowohl für das Lernen, als auch Abrufen von Begriffen (Saykin, Johnson et al. 1999; Kensinger, Clarke et al. 2003). In elektrophysiologischen Studien an Neuronen des medialen Temporallappens ergab sich eine klare Korrelation zwischen der elektrischen Aktivität während des Lernens und der späteren Erinnerungsleistung (Cameron, Yashar et al. 2001). Hinweise auf eine unterschiedliche Spezialisierung der beiden parahippokampalen Gyri ergeben sich aus einer PET-Studie von Fujii et al., in der entweder alle Wörter erkannt werden sollten, die zum ersten Mal auftraten, oder alle, die bereits vorgekommen waren. Dabei zeigte sich eine differentielle Aktivierung des linken GPH für die neuen Wörter, während die Aktivierung des rechten GPH offensichtlich mit dem Wiedererkennen assoziiert war (Fujii, Okuda et al. 1997). Heckers et al. haben das Lernen von Wörtern

mittels Wiederholung und semantischer Einordnung verglichen. Der Vergleich des Wiedererkennens der durch Wiederholung gelernten Begriffe resultierte in einer relativen Mehraktivierung des linken Hippokampus, während die Aktivierung des rechten Hippokampus mit den semantischen gelernten Begriffen korrelierte (Heckers, Weiss et al. 2002). Diese Beobachtung bestätigt das Ergebnis, dass das Finden von semantischen Lösungsworten mit einer prädominant rechtsseitigen hippokampalen Aktivierung einher ging.

Elektrophysiologische Untersuchungen an neurochirurgischen Patienten weisen darauf hin, dass bestimmte medial temporale Neurone auf das Wiederauftreten von Information reagieren (Heit, Smith et al. 1988). Diese Beobachtungen werden von neueren bildgebenden Studien bestätigt. Sakai et al. haben den Einfluss von Ablenkung (Rechenaufgabe) auf die Worterinnerungsfähigkeit untersucht, und eine signifikante Mehraktivierung des Gyrus parahippokampalis immer dann gefunden, wenn zuvor eine Ablenkung stattgefunden hatte. Nach der Ablenkung kam es zu einer Reaktivierung der kortikalen Sprachareale, die ebenfalls aktiv waren, wenn einfach versucht werden sollte, das entsprechende Wort zu behalten. Diese Beobachtung veranlasste die Autoren zu der Annahme, dass der parahippokampale Kortex die Reaktivierung von relevanten kortikalen Arealen triggern könnte, in denen der gesuchte Begriff repräsentiert ist (Sakai, Rowe et al. 2002). Diese These wird durch eine aktuelle Studie gestützt, in der das implizite und explizite Lernen von Sequenzen verglichen wurde. Dabei fand sich eine medial temporale Aktivierung sowohl in der expliziten, als auch impliziten Bedingung, was dahingehend interpretiert wurde, dass der Hippokampus und mit ihm verbundene kortikale Areale ganz allgemein an der Verknüpfung höhergradiger Assoziationen beteiligt sind, unabhängig davon ob diese bewusst oder unbewusst abläuft (Schendan, Searl et al. 2003). Dass der Hippokampus bereits unbewusste Information berücksichtigt, wird an einer Studie von Henke et al. deutlich, bei der anhand von Fotos der Beruf von Personen geraten werden sollte. Dabei zeigte sich eine eindeutige hippokampale Mehraktivierung für die Fotos, die bereits in einem vorausgehenden Durchgang unterschwellig gezeigt worden waren, und zwar nur für jene, die bereits mit einer Berufsbezeichnung versehen waren (Henke, Mondadori et al. 2003).

Die allgemeine Bedeutung des parahippokampalen Gyrus für das deklarative Gedächntis wird auch an klinischen Fällen deutlich. So weisen Patienten mit altersbedingten kognitiven

Defiziten ein verringertes parahippokampales Volumen auf, Untersuchungen der Ursache von Glukokortikoid-induzierten Störungen des deklarativen Gedächtnis offenbarten eine signifikante Minderdurchblutung des parahippokampalen Gyrus (de Quervain, Henke et al. 2003; Pantel, Kratz et al. 2003).

In Bezug auf die mögliche Kommunikation des parahippokampalen Kortex mit den frontalen und parietotemporalen Aktivierungsherden sind die Ergebnisse anatomischer Tracer-Studien zu erwähnen. Eine Untersuchung der neuronalen Konnektivität des medialen präfrontalen Kortex zeigte neben den bekannten Verknüpfungen zu verschiedenen frontalen Arealen ausgeprägte Verbindungen zum temporalen Kortex, unter anderem zum Gyrus temporalis superior, der den STS beinhaltet und dem Gyrus parahippokampalis (Bachevalier, Meunier et al. 1997). Offensichtlich verfügen also sowohl die relevanten Strukturen der impliziten (STS) als auch expliziten Bedingung (PHG) über eine direkte anatomische Verbindung mit dem medialen präfrontalen Kortex, der sich bereits zuvor als zentrales Korrelat der Beurteilung von semantischer Kohärenz gezeigt hatte.

Thalamus

Die Bedeutung des Thalamus, insbesondere des Nucleus anterior, für die Sprachverarbeitung wurde bereits im Rahmen der Gesamtaktivierung diskutiert.
Klinische Studien an amnestischen Patienten weisen ausserdem auf die Bedeutung eines intakten Papez-Kreises für mnestische Funktionen hin. Bezüglich der gleichzeitigen Aktivierung des Thalamus und des Gyrus parahippocampalis zum Entscheidungszeitpunkt (R) ist eine elektrophysiologische Studie zu erwähnen, in der gezeigt wurde, das 75% der anterior thalamischen Neurone synchron mit hippokampalen Neuronen feuern, was eine funktionelle Kopplung der beiden Strukturen nahelegt (Vertes, Albo et al. 2001). In eine ähnliche Richtung weisen die Ergebnisse von Rattenexperimenten, die zeigen, dass eine Läsion des vorderen Thalamus in einer Minderaktivierung des gleichseitigen Hippokampus resultiert (Jenkins, Dias et al. 2002).

Basalganglien

Neben der geschilderten Aktivierung des parahippocampalen Gyrus korrelierte das explizite Erkennen von semantischer Kohärenz mit einer deutlichen rechtsbetonten Aktivierung der Basalganglien, die den rechten Nucleus caudatus, sowie in geringerem Ausmaß das linke

Putamen, und, schwer vom Nucleus caudatus abzugrenzen, den äußeren Anteil des rechten Globus pallidus umfasste.

Gemäß der in der Einleitung vorgestellten Theorien über das implizite Lernen, hätte man eine Aktivierung der Basalganglien auch in der impliziten Bedingung erwarten können. Bei näherer Betrachtung des Versuchsaufbaus macht die Aktivierung jedoch durchaus Sinn.
Die Basalganglientheorie des impliziten Lernens geht ja davon aus, dass in den Basalganglien mit ihren ausgebreiteten kortikalen Verknüpfungen die Korrelation koinzident auftretender Information gelernt und wiedererkannt wird. Dabei wird die neuronale Verknüpfung von gleichzeitig oder in gleichen Kontexten aktivierten neuronalen Clustern gestärkt, so dass später bereits das Vorhandensein eines Teilaspekts zu einer Reaktivierung des ganzen assoziativen Netzwerkes führt (Liebermann 2000). Während in der impliziten Bedingung die Kohärenz gering ist und nur unterschwellig wahrgenommen wird, käme es dementsprechend in der expliziten Bedingung zu einer vergleichsweise starken Kohärenzwahrnehmung (Basalganglien), welche in einer Aktivierung der entsprechenden kortikalen Areale resultiert (vorderer IFG), in denen die sprachliche Repräsentation des gesuchten Wortes lokalisiert ist. Im direkten Vergleich von implizitem und explizitem Erkennen würde man also erwarten, dass beide Fälle auf einem mutmaßlich über die Basalganglien vermittelten Kohärenzerkennungsmechanismus beruhen, jedoch die Übereinstimmung und damit die neuronale Verstärkung durch die Basalganglien im Falle der expliziten Bedingung stärker ist und somit in einer höheren Aktivierung der gemeinsamen kortikalen Assoziationsfelder resultiert, die schließlich eine explizite Benennung des wahrgenommenen Zusammenhangs ermöglicht.

Dass die Basalganglien eine entscheidende Rolle bei der automatischen voraussagenden Sequenzierung von Abläufen, sowohl im motorischen als auch kognitiven Bereich haben, zeigen die Arbeiten von Knowlton und Squire (Knowlton, Ramus et al. 1992; Knowlton, Squire et al. 1994; Knowlton, Mangels et al. 1996; Knowlton and Squire 1996). In Wahrscheinlichkeitsabschätzungsaufgaben zeigten sich Patienten mit Parkinson- und Huntington-Krankheit deutlich beeinträchtigt, während amnestische Patienten und Patienten mit frontalen Hirnschäden normal agierten (Knowlton, Squire et al. 1996). Die Rolle der Basalganglien beim proceduralen, bzw. impliziten Lernen wird von einer Reihe bildgebender Studien untermauert, wobei sowohl beim Lernen als auch Ausführen

verschiedener Bewegungssequenzen signifikante Aktivierungen der Basalganglien, insbesondere im Bereich des Putamen beschrieben werden (Jenkins, Brooks et al. 1994; Schlaug, Knorr et al. 1994; Berns, Cohen et al. 1997; Rauch, Whalen et al. 1997).
Neben Studien über die Ausführung komplexer motorischer Sequenzen gibt es auch Untersuchungen über das Lernen abstrakter Zusammenhänge. In einer fMRI-Untersuchung des impliziten Lernens von Wahrscheinlichkeitszusammenhängen wurde eine Aktivitätssteigerung im Bereich des Nucleus caudatus beobachtet (Poldrack, Prabhakaran et al. 1999). Zusammenfassend gibt es Hinweise, dass das implizite Lernen motorischer Abläufe vorwiegend auf einer Aktivierung des Putamen beruht, während kognitive Aufgaben, wie im Fall der Wahrscheinlichkeitsabschätzung eher über den Nucleus caudatus vermittelt werden.

Dank ihrer dichten Verknüpfung mit nahezu allen kortikalen Arealen, ihrer komplexen afferenten Verschaltung und den dopaminergen Potenzierungsmechanismen scheinen sich die Neurone des Striatum aus netzwerktheoretischer Sicht ideal für Mustererkennungs-aufgaben zu eignen (Houk, Adams et al. 1995; Wickens, Kotter et al. 1995). Man geht davon aus, dass die einem bestimmten Muster entsprechenden aktiven kortikostriatalen Synapsen über das in der Pars compacta des Nucleus subthalamicus (SNc) synthetisierte Dopamin verstärkt werden, dessen Ausschüttung durch limbische und hypothalamische Einflüsse getriggert wird, die den Belohnungswert einer bestimmten Verknüpfung kodieren (Schultz, Romo et al. 1995). Aufgrund seiner Eigenschaft aktive Neurone zu verstärken und weniger aktive zu unterdrücken, wird dem Dopamin eine entscheidende Rolle bei der differentiellen Verstärkung und Kontrastierung relevanter Ereignisse zugeschrieben (Wickens, Kotter et al. 1995). In Studien an Menschenaffen fanden Schultz und Kollegen, dass bestimmte Populationen striataler Neurone selektiv auf bestimmte Teilschritte einer Handlungssequenz reagierten, jedoch angesichts der Belohnung wieder aufhörten zu „feuern“, sprich eher auf den Prädiktor eines bestimmten Ereignisses ansprachen, als auf das resultierende Ergebnis selbst (Schultz, Romo et al. 1995). Diese Spezialisierung auf Teilkomponenten einer Informationssequenz könnte eine Erklärung für die beobachtete striatale Aktivierung bei sequentiellen Vorhersageaufgaben sein. In Analogie zum proceduralen Lernen berichtet Speedie über einen Patienten mit Schädigung der rechten Basalganglien der nicht mehr in der Lage war, Redewendungen und andere eher automatische Sprachfunktionen wie Singen, Reimen, Grußfloskeln und ähnliches

anzuwenden, wohingegen die „bewusste“ Sprache unbeeinträchtigt schien (Speedie, Wertman et al. 1993).

Ungeklärt ist die Frage, wie eine rückwirkende Verstärkung entsprechender Verbindungen funktionieren kann, wenn die Dopaminausschüttung zum Zeitpunkt der Belohnung erfolgt, also erst nachdem die damit assoziierten und somit potentiell prädiktiven Ereignisse eingetreten sind. Hierbei scheint die ungewöhnlich hohe Konzentration an Calcium-Calmodulin-abhängiger Proteinkinase II (CaM PK II) im Striatum eine entscheidende Rolle zu spielen (Newman-Gage and Graybiel 1988). CaM PK II verstärkt die Wirkung von Glutamat-Rezeptoren, über welche der afferente kortikostriatale Input vermittelt wird und verfügt zudem über eine extrem langsame Autophosphorylisationsdauer von mehreren hundert Sekunden, die eine protrahierte Aktivierung und somit retrograde präsynaptische Langzeitpotenzierung erklären könnte (Meyer, Hanson et al. 1992). Auf diese Weise würden natürlich zunächst alle möglichen Ereignisse verstärkt, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ereignen, was erklären könnte, warum prozedurales oder implizites Lernen nur über differentielle Wiederholung funktioniert und im Gegensatz zum expliziten Gedächtnis kein Single-trial Learning möglich scheint.

Wie könnte also das implizite Schließen von einem vorausgehenden Ereignis auf ein nachfolgendes funktionieren? Das Striatum ist über einen langsamen direkten inhibitorischen und einen schnellen indirekten exzitatorischen Pfad mit der Substantia nigra (SNc) verbunden. Houk et al. vermuten, dass das Dopamin anfänglich zunächst im Zusammenhang mit dem positiven Ergebnis (R) der entsprechenden Operation ausgeschüttet wird, und so die Verknüpfung mit dem vorausgehenden Ereignis (E) stärkt. Ist die Verknüpfung von E und R im Striatum einmal gelernt, kommt es über den schnellen exzitatorischen Pfad zu einer Dopaminausschüttung bereits beim Auftreten von E, während der langsamere direkte Pfad die limbische Aktivierung des SNc durch das nachfolgende Auftreten von R hemmt (Houk, Adams et al. 1995). Ein solcher Mechanismus würde die Beobachtung erklären, dass die striatale Antwort auf R mit zunehmender Lerndauer nachlässt (Schultz and Romo 1992). Auf diese Weise könnte also das Striatum den Vorhersagewert von bestimmten Ereignissen bewerten und über die thalamische Schaltstation seiner kortikostriatalen Schleifen die relevanten motorischen und kognitiven Areale aktivieren.

Welche Rolle die Basalganglien bei der impliziten Kodierung und Dekodierung proceduraler Muster spielen, wird am Beispiel der nonverbalen Kommunikation deutlich. Zahlreiche Studien weisen darauf hin, dass die Basalganglien sowohl bei der Produktion als auch Interpretation nonverbaler Kommunikation beteiligt sind (Cancellier and Kertesz 1990; Wedell 1994; Hornak, Rolls et al. 1996). Dass Parkinson und Huntington-Patienten Schwierigkeiten haben, ihren Gesichts- und Sprachausdruck zu modulieren, ist hinreichend bekannt. Während beim Morbus Parkinson vor allem die Ausdrucksstörungen führen (Benke, Bosch et al. 1998), scheinen Huntington-Patienten eher Probleme beim Verständnis nonverbaler kommunikativer Signale zu haben (Speedie, Brake et al. 1990; Jacobs, Shuren et al. 1995; Sprengelmeyer, Young et al. 1996; Gray, Young et al. 1997). In einer PET-Studie fanden Morris et al., dass die Basalganglien bereits aktiv waren, wenn die Versuchspersonen die präsentierten Gesichter noch nicht einmal bewusst wahrnahmen (Morris, Ohman et al. 1999). Nachdem bei Parkinson-Patienten also eher die nonverbale Ausdrucksfähigkeit, bei Huntington das nonverbale Verständnis gestört ist, folgert Lieberman entsprechend den vornehmlich betroffenen Strukturen, dass das Putamen in erster Linie für die Kodierung nonverbaler Reize zuständig ist, während der Nucleus caudatus vor allem an deren Interpretation beteiligt ist (Liebermann 2000).

Nucleus Caudatus

Elliott und Dolan fanden eine Aktivierung im Bereich des Ncl. caudatus beim Treffen von Geschmacksentscheidungen, die vorher durch subliminale Präsentation der entsprechenden Objekte geprimed wurden (Elliott and Dolan 1998). Andere Studien betonen die Rolle des Ncl. caudatus bei der Verarbeitung positiver emotionaler Stimuli (Lane, Reiman et al. 1997; Lane, Reiman et al. 1997; Phillips, Young et al. 1997; Canli, Desmond et al. 1998), was in der allgemeinen Vorstellung resultiert, dass die Verarbeitung positiver Gesichtsausdrücke wie Freude über die Basalganglien läuft, während negative Ausdrücke wie Furcht oder Abscheu eher über die Amgydala wahrgenommen werden (Tranel and Hyman 1990; Adolphs, Tranel et al. 1995; Morris, Frith et al. 1996; Young, Hellawell et al. 1996; Furmark, Fischer et al. 1997; Lane, Reiman et al. 1997; Adolphs, Tranel et al. 1998; Birbaumer, Grodd et al. 1998; Phillips, Young et al. 1998; Phillips, Williams et al. 1999).

In Bezug auf die beobachtete Korrelation mit dem expliziten Erkennen von Kohärenz, könnte die Basalganglienaktivierung also sowohl mit dem inhaltlichen Aspekt der Bedingung, d.h. dem eigentlichen Erkennen der semantischen Kohärenz und der Aktivierung der entsprechenden kortikalen Areale, in Zusammenhang stehen, als auch mit dem allgemeinen positiven Feedback durch erfolgreiche Beantwortung der Aufgabe. Dass die Basalganglien über die entsprechenden Verbindungen zu den weiteren an der Aufgabe beteiligten kortikalen Arealen verfügen, zeigen Tracer-Studien an Cebus-Affen, in denen sowohl frontomediale als auch frontolaterale Projektionen der Basalganglien zur Darstellung kamen (Middleton and Strick 2002).

Auf eine direkte oder indirekte Beteiligung des Nucleus caudatus bei sprachlichen und semantischen Aufgaben weist eine Reihe von klinischen Fallberichten hin. Pickett et al. berichten über einen Patienten mit einer beidseitigen Schädigung im Bereich des Putamen und des Caudatus-Kopfes, der deutliche Störungen im Verständnis syntaktisch verschränkter Sätze zeigte, wobei das normale Wortverständnis und Gedächtnis nicht beeinträchtigt schienen (Pickett, Kuniholm et al. 1998). Eine Untersuchung von 12 Patienten mit Caudatus-Läsionen ergab Defizite bei der freien Wiedergabe episodischer und semantischer Inhalte, während das reine Wiedererkennen ebenfalls unbeeinträchtigt schien (Mendez, Adams et al. 1989). Die Beteiligung des Nucleus caudatus an der semantischen Analyse unterstreichen die Ergebnisse der elektrophysiologischen Untersuchungen von Abdullaev, der fand, dass die Feuerrate von Neuronen des Nucleus caudatus mit semantischen Fragestellungen korrelierte und zudem feststellte, dass das elektrische Antwortverhalten der entsprechenden Neurone eine große Ähnlichkeit mit Neuronen des Broca-Areals aufwies (Abdullaev and Melnichuk 1997; Abdullaev, Bechtereva et al. 1998). Eine signifikante Aktivierung des Caudatus fand sich auch bei durch vorgegebene Teilfeatures induzierten mentalen Repräsentation von Objekten. Neben der bereits erwähnten Aktivierung des prä-SMA wurde hier eine Mehraktivierung des Nucleus caudatus beider Seiten beobachtet (Kraut, Kremen et al. 2002).

In diesem Sinne lassen sich also sowohl die Aktivierung des prä-SMA, als auch der Basalganglien als Ausdruck des erfolgreichen Erkennens eines semantischen Zusammenhangs interpretieren. Die Tatsache, dass der prä-supplementär motorische Kortex sowohl in der impliziten als auch expliziten Bedingung aktiv war, deutet dabei eher

auf eine allgemeine Funktion bei der Repräsentation und Beurteilung komplexer polymodaler Information hin, während die Aktivierung der Basalganglien offensichtlich mit dem erfolgreichen Finden einer expliziten Lösung in Zusammenhang stand und mit einer Aktivierung des mit dem Wortgedächtnis assoziierten parahippocampalen Gyrus, sowie entsprechender kortikaler Sprachareale korrelierte.

Gyrus cinguli

Neben der Aktivierung des Gyrus parahippocampalis und der Basalganglien, korrelierte der Zeitpunkt des expliziten Kohärenzerkennens zudem mit einer signifikanten Aktivierung des Cingulum, wie sie im Zusammenhang mit der erfolgreichen Lösung kognitiver Aufgaben und allgemeinen Belohnungsaspekten beschrieben wird (Shidara and Richmond 2002; Hadland, Rushworth et al. 2003).

In Bezug auf das gleichzeitige Auftreten der cingulären und parahippokampalen Aktivierung gibt es zudem interessante Parallelen zu einem PET-Experiment über das Lernen und Wiedererkennen von Wortpaaren in dem eine funktionelle Koppelung der regionalen Durchblutungsänderungen des parahippokampalen und des cingulären Gyrus beobachtet wurde (Krause, Horwitz et al. 1999).

Colliculus superior

Die Analyse der expliziten Bedingung ergab zuletzt eine deutliche Aktivierung der Colliculi superiores, die zum Zeitpunkt des Kohärenzerkennens ihre maximale Ausprägung erreichte. Die Beteiligung des Colliculus superior bei der visuellen, vor allem visuospatialen Analyse und Koordination von Augenbewegungen ist hinreichend bekannt. Darüber hinaus scheinen die oberen Colliculi eine zentrale Rolle bei der Integration crossmodaler Stimuli zu spielen. Tierexperimentelle Studien zeigen, dass koinzidente Information, d.h. Stimuli, die am gleichen Ort, oder zur gleichen Zeit auftreten, in einer über die Einzelkomponenten hinausgehenden Aktivierung der Colliculi superiores resultieren. Neuere bildgebende Studien mit einer zeitlich variierten Präsentation audiovisueller Stimuli bestätigen die Sensitivität des Colliculus superior für das gleichzeitige Auftreten heteromodaler Information (Calvert, Hansen et al. 2001; Bushara, Hanakawa et al. 2003). Neben dem Colliculus superior, der am stärksten auf das koinzidente Auftreten der Stimuli reagierte, zeigte sich eine Mehraktivierung in frontalen

und parietalen Arealen, sowie dem Sulcus temporalis superior, dessen Rolle bei der Verarbeitung crossmodaler Stimuli bereits diskutiert wurde.
In Zusammenschau der publizierten Daten lässt sich also vermuten, dass sowohl der parietale Kortex und STS, als auch der Colliculus superior an der Analyse multimodaler Information beteiligt sind. Während das temporoparietale Netzwerk vermutlich eher an der allgemeinen Repräsentation und Prozessierung polymodaler Information beteiligt ist, scheint die eigentliche Beurteilung der Kohärenz der präsentierten Information in den frontomedianen Strukturen statt zu finden, im Zusammenspiel mit den Basalganglien und den Colliculi superiores.

Dass die Colliculi superiores theoretisch über den „anatomischen" Zugang zu den relevanten Informationen verfügen, legen funktionelle kernspintomographische Berechnungen der effektiven Konnektivität nahe, die neben den bekannten Verbindungen zum frontalen Augenfeld und occipitalen Kortex auch ausgedehnte parietale Verknüpfungen ergeben (Gitelman, Parrish et al. 2002). Entsprechend dem in anderen Domänen etablierten Reafferenzprinzip könnten die Colliculi superiores auf einem primitiven, sozusagen präkognitiven Niveau, das match, bzw. missmatch zwischen verschiedenen Informationen berechnen und auf diese Weise sowohl an der Exekution musterorientierter Augenfolgebewegungen, als auch an der Evaluation der semantischen Kohärenz polymodaler Information beteiligt sein (von Holst und Mittelstaedt 1950).

4.2 Methodik

4.2.1 fMRT-Messungen mit gesprochener Sprache

Unabhängig von der inhaltlichen Interpretation zeigen die vorliegenden Resultate, dass es möglich ist, funktionelle Kernspinexperimente mit gesprochener Sprache durchzuführen. Die Ergebnisse bestätigen den methodischen Ansatz von Birn und Bandettini, die gezeigt hatten, dass es mit Hilfe eines Ereignis-korrelierten Designs möglich ist, neuronale Aktivierung und bewegungsbedingte Artefakte zu unterscheiden und auf diese Weise Experimente mit gesprochener Sprache durchzuführen (Birn, Bandettini et al. 1998; Birn,

Bandettini et al. 1999; Birn, Cox et al. 2002; siehe auch Palmer, Rosen et al. 2001 und Huang, Carr et al. 2002).

Neben dem Studiendesign und der beschriebenen statistischen Korrekturalgorithmen kommt nach Ansicht des Autors vor allem der ausführlichen Instruktion und Motivation der Probanden und der möglichst natürlichen Gestaltung des Experiments eine besondere Rolle zu. Entgegen dem allgemeinen Trend, ein möglichst umfangreiches und hochrepetitives Stimulusmaterial zu verwenden, weisen die Ergebnisse der Studie darauf hin, dass es unter Umständen durchaus sinnvoll sein kann, ein möglichst kurzes, aber spannendes Material zu verwenden, das eine hohe mentale Konzentration auf die Aufgabe gewährleistet und so hilft, Bewegungsartefakte zu vermeiden. Zwar lassen sich mit einer größeren Anzahl der Ereignisse theoretisch auch noch kleinere Effekte erfassen, allerdings zu Ungunsten der kognitiven Spezifität, auf Grund einer nicht zu unterschätzenden ablenkungsbedingten Überlagerung der eigentlichen Aufgabe. Quantitative Untersuchungen des Einflusses der mentalen Konzentration und der Zufriedenheit mit den Versuchsbedingungen auf die Qualität der Ergebnisse sind dem Autor nicht bekannt und wären eine sinnvolle Ergänzung methodischer Studien.

Was die Miteinbeziehung der Realignment-Faktoren als Koregressoren betrifft, ergeben sich im Vergleich zur Auswertung ohne Realignmentparamter keine strukturellen Unterschiede, jedoch eine tendentiell verminderte Aktivierung der einzelnen Herde. Wie theoretisch zu erwarten, resultiert die Miteinbeziehung von Kofaktoren also in einer Erhöhung der Spezifität zu Lasten der Sensitivität, was zu Gunsten der Validität der Ergebnisse in Kauf genommen wurde.

4.2.2 Kontrollbedingung

Zur Kontrolle der durch die allgemeinen Versuchsbedinungen wie Lesen, Augenbewegungen und Tastendruck verursachten Aktivierung, wurde eine Baseline-Bedingung aus in Bezug auf Buchstabenhäufigkeit und Groß- und Kleinschreibung balancierten Pseudowörtern verwandt, welche die gleichen Primäranforderungen beinhaltete.
Um die Zulässigkeit dieser zahlreichen Sprachexperimenten zu Grunde liegenden Annahme zu untersuchen, wurden in einer neueren Studie die neuronalen Anforderungen des Lesens

von Wörtern und Pseudowörtern verglichen und dabei ein ähnliches Muster aus Aktivierungsherden im Bereich des linken Gyrus frontalis inferior (IFG), linken Cerebellum, hinteren Gyrus temporalis inferior und occipitalen Kortex beider Seiten gefunden. Das Lesen der Pseudowörter resultierte in einer leichten Mehraktivierung des linken Operkulum und linken unteren temporalen Gyrus (ITG), sowie rechten Cerebellum. Eine signifikante Mehraktivierung bei den echten Wörtern wurde nicht berichtet, was darauf hindeutet, dass keine der beobachteten Aktivierungen auf eine reine Mehranforderung der Antwortbedingungen zurückzuführen ist und die Pseudowörter somit hinreichend für die Grundanforderungen der Aufgabe kontrollieren (Mechelli, Gorno-Tempini et al. 2003).

Eine vergleichende Metaanalyse von 11 PET-Studien, bei denen einzelne Wörter laut gelesen werden sollten, ergab eine signifikante bilaterale Mehraktivierung im Bereich des motorischen, prämotorischen, und temporalen Kortex, sowie des Gyrus fusiformis und des Cerebellum (Turkeltaub, Eden et al. 2002). Die isolierte Darstellung der Kontrollbedingung verdeutlicht die durch die experimentelle Anforderung bedingte neuronale Aktivität, bestehend aus einer beidseitigen Aktivierung des Kleinhirns, Gyrus praecentralis (BA 6), medialen Anteils des Gyrus frontalis und beidseitigen occipitalen Kortex (BA 18), die zusammenfassend als Ausdruck der visuellen Exploration des Materials und der motorischen Anforderungen der Aufgabe interpretiert werden können.

4.2.3 Versuchsgruppe und Hemisphärendominanz

In Bezug auf die Versuchsgruppe bleibt kritisch anzumerken, dass zu Gunsten der Gruppenhomogenität ausschließlich rechtshändige Männer untersucht wurden. Die Hemisphärendominanz rechtshändiger Probanden in Bezug auf sprachliche Aufgaben wurde in zahlreichen Studien untersucht, so dass aufgrund der komplexen Fragestellung bewusst rechtshändige Probanden gewählt wurden, für die eine fundierte Anzahl an vergleichbaren Studien besteht. Angesichts der Tatsache, dass Frauen bei der Bearbeitung sprachlicher Aufgaben ein weniger stark lokalisiertes und mehr bilaterales Aktivierungsmuster zeigen als Männer, und Frauen pauschal eine eher ganzheitliche Denkweise zugesprochen wird, erscheint eine vergleichende Untersuchung einer weiblichen Korntrollgruppe überlegenswert. Im zweiten Vorexperiment, bei denen 10 Männer und 10 Frauen getestet wurden, ergab sich allerdings kein Hinweis auf ein signifikant unterschiedliches Antwortverhalten. Um interindividuelle Unterschiede zu

untersuchen, wäre es ausserdem interessant gewesen, persönlichkeitsspezifische Parameter, wie Extroversion-Introversion und Spontaneität-Kontrolle, zu erfassen, die nach dem Eindruck des Autors einen deutlichen Einfluss auf die Fähigkeit hatten, einen impliziten Eindruck wahrzunehmen und spotan wiederzugeben. Angesichts der begrenzten Anzahl an Versuchspersonen, erschien eine Differnzierung der vorliegenden Population in weitere Untergruppen jedoch statistisch nicht sinnvoll.

In vergleichenden Untersuchungen über das Zuhören eines vorgelesenen Textes zeigen beide Geschlechter ein primär linksseitig betontes temporales Aktivierungsmuster. Dabei war die Aktivierung bei Männern eindeutig linksseitig lokalisiert, während Frauen eine deutlich bilateral betonte Aktivierung zeigten (Phillips, Lowe et al. 2001). Tests mit einseitigen phonologischen Diskriminationsaufgaben scheinen diese Geschlechterdifferenz auf der Verhaltensebene zu bestätigen (Coney 2002). Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden jedoch nicht nur beim passiven Sprachverständnis beobachtet, sondern auch bei der Lösung semantischer Aufgaben. In einer vergleichenden funktionellen kernspin-tomographischen Studie einer kategoriellen Zuordnungsaufgabe (Getränk-Milch = richtig, Fahrzeug-Karotte = falsch) zeigten Männer eine eindeutig linksseitige, Frauen eine ebenfalls linksseitig betonte, jedoch beidseitige frontale (IFG) und temporale (STG) Aktivierung (Baxter, Saykin et al. 2003).

Es bleibt also festzuhalten, dass die sprachliche Verarbeitung in beiden Geschlechtern prädominant linksseitig verläuft (Frost, Binder et al. 1999), bei Frauen jedoch weniger lokalisiert und unter stärkerer Miteinbeziehung der rechten Hirnhälfte. In Bezug auf den holistischen Aspekt der untersuchten Aufgabe und der Tatsache, dass Frauen offensichtlich stärker beide Hirnhälften zur Lösung sprachlicher Aufgaben einbeziehen, wäre eine vergleichende Untersuchung einer weiblichen Kontrollgruppe zu erwägen.

4.2.4 Statistische Methoden

Die Frage nach den zur Darstellung kommenden statistischen Niveaus ist besonders kritisch zu diskutieren. Zum einen lassen sich mit Hilfe der individuellen ereigniskorrelierten Auswertung unvorhersagbare, individuelle Bedingungen vergleichen und in Bezug auf ihren genauen Zeitpunkt modellieren. Auf der anderen Seite resultiert die rein verhaltensabhängige Festlegung der Bedingungen zwangsläufig in einer individuellen

Differenz der Antworthäufigkeit, so dass die Ergebnisse der einzelnen Bedingungen zwar in sich valide, jedoch nur bedingt quantitativ vergleichbar sind. Ein standardisierter Vergleich der einzelnen Kontraste auf dem niedrigsten statistischen Niveau ($p < 0.001$, 15 Voxel Mindestaktivierung, ergab jedoch keine strukturellen Aktivierungsunterschiede (s. Abb 16 und 17). Die Hauptaktivierungen, das medial und lateral präfrontale und posterior parietale Aktivierungsmuster, bestätigt sich in allen Kontrasten und zeigt sich von weiteren statistischen Modifikationen, wie Realignment-Korrektur, Global Scaling und anderen in der statistischen Aufarbeitung der Daten variierten Teilschritten unbeeinflusst. Für sämtliche dargestellten Aktivierungen gilt, dass jeweils der höchst mögliche statistische Level gewählt wurde, der alle im weitesten Sinn relevanten Strukturen, die sich auf einem niedrigeren Niveau gezeigt hatten, beinhaltet. Die Abgrenzung „unrelevanter“ Aktivitäten ist besonders kritisch zu bewerten, da hier leicht vorgefertigte Hypothesen und unbewusste Erwartungshaltungen zum Tragen kommen. Im vorliegenden Fall wurden daher nur signifikanten Aktivitäten benachbarte Voxel vernachlässigt, die keiner zusätzlichen Struktur zugeordnet werden konnten, und somit keinen inhaltlichen Einfluss auf die Interpretation hatten. Angesichts der Komplexität der untersuchten Aufgabe und den diskutierten statistischen Unwägbarkeiten, lassen sich die Ergebnisse komplexer Studien ohnehin nur in der Gesamtschau verschiedener Analysen interpretieren. Jede isolierte Einzeldarstellung einer der Erwartung entsprechenden Einzelauswertung birgt die Gefahr einer unbewussten und durchaus unbeabsichtigten hypothesengeleiteten Manipulation. Zur Kontrolle findet sich am Ende der Ergebnisse und im Anhang eine Auflistung sämtlicher Kontraste auf dem niedrigsten Niveau, die also sämtliche potentiellen Aktivierungsherde umfasst.

4.2.5 Zeitliche Auswertung

Angesichts der beschränkten zeitlichen Auflösung der ausgewerteten Messungen und bekannten Variabilität der BOLD-Response ist die genaue Interpretation der differentiellen zeitlichen Auswertung kritisch abzuwägen. Zwar scheint die BOLD-Response innerhalb eines neuronalen Areals eines Individuums sehr konstant, weist jedoch eine ausgeprägte interindividuelle und interkortikale Bandbreite auf, so dass nicht ohne weiteres vom Zeitpunkt des Peaks der hämodynamischen Response auf den Zeitpunkt der neuronalen Aktivität geschlossen werden darf (Miezin, Maccotta et al. 2000). Der vorliegenden Analyse liegt die Annahme zu Grunde, dass die wahre BOLD-Response eines Voxels einer

exakten, jdeoch nicht näher bekannten Kurve folgt. Nachdem die, den verschiedenen Analysen zu Grunde liegenden, statistischen Karten identisch sind und SPM eine konstante hämodynamische Referenzfunktion benutzt, lassen sich durch die Modellierung verschiedener Ereignispunkte unterschiedliche Zeitpunkte der individuellen HRF abgreifen. Dieser Vorstellung entsprechend zeigt der Vergleich der resultierenden Aktivierungen einen in den meisten Fällen stetigen Verlauf der z-Werte, wie zum Beispiel im präsupplementärmotorischen Kortex: 4,92-5,00-5,23-5,46-5,17 (S-SP-R-RP-RP2, Kontrast cohim>baseline). Die Stetigkeit der Ergebnisse und Plausibilität des zeitlichen Musters der Aktivierung sprechen für die Richtigkeit der gemachten Annahmen.

Um den genauen Verlauf der Aktivierung quantitativ zu modellieren, liesse sich eine fixed-effects-Analyse über die Daten aller Probanden rechnen, die jedoch wiederum das Problem der mangelnden Verallgemeinbarkeit hätte, da hier in Bezug auf die Gruppe nicht signifikante individuelle Effekte das Gesamtergebnis entscheidend verzerren können. Zudem müsste hier wiederum ein „wahrer“ Zeitpunkt für das Auftreten der Ereignisse angenommen werden. Eine echte quantitative Analyse der Intensitäten wäre also nur in einer hypothesenfreien Modellierung mittels ICA (Independent Component Analysis) möglich, die aber hinsichtlich der Komplexität und Überschneidungen der Ereignisse im Moment noch nicht ausreichend etabliert ist (Calhoun, Adali et al. 2002; Esposito, Formisano et al. 2002). Die weitergehende Entwicklung der diesem Ansatz zu Grunde liegenden statistischen Algorithmen lässt für die Zukunft neue Möglichkeiten einer annahmefreien Auswertung erwarten, was zur Überprüfung angenommener Modelle und zur weiteren Entwicklung neuer Hypothesen wünschenswert erscheint (Svensen, Kruggel et al. 2002).

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war, die neuronalen Mechanismen intuitiver Urteilsprozesse zu untersuchen und einer experimentellen Überprüfung zugänglich zu machen.

Dem experimentellen Teil der Arbeit geht eine Bestandsaufnahme geistes-wissenschaftlicher Intuitionskonzepte voraus, in welcher der Intuitionsbegriff aus dem Blickwinkel seines sprachlichen Gebrauchs und seiner Bedeutung im Kontext verschiedener philosophischer Konzepte analysiert wird. Der geisteswissenschaftlichen Untersuchung folgt eine Zusammenfassung psychologischer Intuitionsmodelle und neurobiologischer Grundlagen impliziter Wahrnehmungsleistungen, welche die Basis des nachfolgenden Experiments bilden. Versucht man Intuition als Gesamtphänomen zu fassen und zieht in Betracht, dass intuitive Prozesse nicht nur in typischen „intuitiven" Kontexten, wie Geschmacksurteilen oder komplexen sozialen Entscheidungen vorkommen, sondern auch in rationalen Domänen wie der naturwisschenschaftlichen Forschung, lässt sich Intuition als Überbegriff verschiedener impliziter Teilfunktionen beschreiben, die sich auf Teilaspekte zu lösender Aufgaben beziehen.

Das kleinste gemeinsame Vielfache verschiedener intuitiver Wahrnehmungsprozesse zusammenzufassend wird mit Intuition die Fähigkeit beschrieben**,** Urteile oder Entscheidungen über Reizaspekte oder Zusammenhänge zu fällen, ohne sich der Grundlage dieser Entscheidungen bewusst zu sein. Erst das Ergebnis des zu Grunde liegenden impliziten Prozesses wird bewusst und kann expliziert werden. Auf diese Weise scheint die intuitive Erkenntnis dem Erkennenden unmittelbar mit dem Erkannten verknüpft und von einem Gefühl subjektiver Gewissheit begleitet.

Auf diesen Überlegungen aufbauend schließt der Autor, dass Intuition und Ratio keine qualitativ eigenen Erkenntnisqualitäten darstellen, sondern vielmehr die Extreme eines Kontinuums zwischen zwei in ihrem Modus verschiedenen, jedoch unmittelbar miteinander verwobenen Informationsverarbeitungsprozessen bilden, mit einem impliziten,

musterartigen Wahrnehmungsprozess auf der Seite der Intuition und einem expliziten, operativen Prozess auf Seite der Ratio. Der implizite Mustererkennungsprozess ist hochgradig parallel und läuft automatisch ab. Er wird als integrierter Erkenntnisakt erlebt und liefert vorselektierte Information für die nachfolgenden „rationalen“ Operationen, in denen die zur Verfügung gestellten Inhalte expliziten Heuristiken folgend prozessiert werden.

Davon ausgehend, dass die Implizität die eigentliche definierende Komponente intuitiver Urteilsprozesse ausmacht, wird am Beispiel der Wahrnehmung semantischer Kohärenz versucht, in ein und derselben Aufgabe implizite und explizite Wahrnehmung von Zusammenhängen zu differenzieren und die zu Grunde liegenden neuralen Prozesse mit funktioneller Kernspintomographie darzustellen. Basierend auf Studien über die Wahrnehmung semantischer Kohärenz wird folgendes Experiment entwickelt: Versuchspersonen sollen beurteilen, ob 3 Begriffe (eine sog. Worttriade) semantisch kohärent sind, d.h. zu einem gemeinsamen Kontext gehören, oder eine gemeinsame Eigenschaft aufweisen, und falls ja, ein entsprechendes Lösungswort angeben, auf das die Begriffe konvergieren. Die Aufgabe erfolgte in einem sog. „Forced-choice“ Design, d.h. die Versuchspersonen wurden angehalten, so schnell wie möglich zu antworten (per Tastendruck) und anschliessend ein entsprechendes Lösungswort zu nennen. Dazu gab es eine Kontrollbedingung aus balancierten Pseudowörtern, die als solche erkannt werden mussten, um für die perzeptiven und motorischen Anforderungen der Aufgabe zu kontrollieren. Auf diese Weise wurden 4 Bedingungen operationalisiert:

1) **Cohex**: der Proband entscheidet kohärent und kann ein entsprechendes Lösungswort angeben („Ja - Lösungswort“ = explizites Erkennen von semantischer Kohärenz)
2) **Cohim**: der Proband entscheidet kohärent, kann jedoch kein Lösungswort angeben („Ja - Weiß nicht“ = implizite Wahrnehmung von semantischer Kohärenz)
3) **Incoh**: der Proband nimmt keine Kohärenz war („Nein - Weiß nicht“ = Erkennen von Inkohärenz)
4) **Baseline**: der Proband erkennt eine Kontrolltriade („X - Test“ = Kontrolltriade)

Das Material bestand aus insgesamt 120 Triaden (50 kohärent, 30 inkohärent, 40 Kontrollen) und wurde in zwei Vorversuchen (insgesamt 33 Probanden) balanciert, um die

einzelnen Bedingungen statistisch vergleichen zu können. Dabei wurden die Triaden so modifiziert, dass sie zu ungefähr gleichen Teilen als inkohärent (56%) und kohärent (44%) beurteilt, und die kohärenten wiederum etwa zur Hälfte explizit (45%) und implizit (55%) erkannt wurden. Das Experiment erfolgte in einem sog. event-related Design, d.h. die Zuteilung der Antworten zu den einzelnen Bedingungen erfolgte anhand des exakten Antwortzeitpunktes und der individuellen Antworten der Probanden, die mit einem nichtmagnetischen Spezialmikrophon aufgezeichnet wurden.

In einem funktionellen kernspintomographischen Experiment wurden 15 männliche, rechtshändige junge Probanden (Durchschnittsalter 25) mit echoplanarer Bildgebung untersucht (1,5 Tesla). Die statistische Analyse der akquirierten Bilddaten erfolgte in einer Random Effects Analyse mit SPM99. Dabei wurden zunächst die statistisch signifikanten Voxel der einzelnen Versuchspersonen modelliert und diese in einer nachfolgenden Second-level Analyse mit einem T-Test über alle Probanden und Bedingungen verglichen. Da die Aufgabe verschiedene Teilschritte, wie das Lesen und Verstehen der Wörter, die Evaluation und Beurteilung der semantischen Kohärenz, sowie die explizite Benennung eines gemeinsamen Lösungswortes umfasste, wurden zudem 5 unabhängige Zeitpunkte modelliert: die Evaluation des Stimulusmaterials (früh und spät), der Zeitpunkt des Kohärenzurteils, und die Antwortphase (früh und spät). In Projektion auf die 3-dimensionale Rekonstruktion der anatomischen Hirndaten und Vergleich mit dem stereotaktischen Atlas von Talairach und Tournoux ergab sich folgendes Aktivierungsmuster:

Die Evaluation und Beurteilung der semantischen Kohärenz, unabhängig vom letztlich getroffenen Urteil (task>baseline), resultierte in einem superior medial und lateral präfrontalen Aktivierungsmuster, die aus einer neuronalen Aktivität im Bereich des Gyrus frontalis inferior links und einer ausgedehnten linksbetonten frontomedianen Aktivierung bestand, welche vom medianen Anteil des oberen Gyrus frontalis (prä-SMA, BA 6) bis zum vorderen Gyrus cinguli zog. Während in den frühen Kontrasten zunächst eine Aktivierung des Thalamus dominierte, korrelierte die Aktivierung der linksseitigen Sprachareale und des prä-SMA mit dem Zeitpunkt des eigentlichen Kohärenzurteils und der nachfolgenden Suche nach einem Lösungswort.

Die weitere Differenzierung in kohärente und inkohärente Urteile (coh>incoh) zeigt, dass sich die frontomediane Aktivierung zusammen mit einer rechtsbetonten Kleinhirnaktivität im wesentlichen auf das Erkennen von Kohärenz zurückführen lässt, wobei das frontomediane „Kohärenzerkennungsmuster“ bereits in der impliziten Bedingung voll ausgebildet war (cohim>baseline).

Neben den erwähnten medial und linkslateral präfrontalen Arealen, ergibt die isolierte Betrachtung des impliziten Erkennens von Kohärenz [cohim>(incoh+cohex)] ein ausgeprägtes temporoparietales Aktivierungsmuster, das den rechten Sulcus temporalis superior (STS) und den parietalen Kortex beider Seiten umfasst und sich auf den impliziten Charakter der Antwort zurückführen lässt (cohim>cohex).

Dass die frontomediane Aktivierung dem eigentlichen Erkennen von Kohärenz zuzurechnen ist, bestätigt sich im Vergleich der impliziten Kohärenzurteile mit den inkohärenten Antworten (cohim>incoh). Obwohl in beiden Fällen keine Lösung angegeben werden konnte („Ja - Weiß nicht“ vs. „Nein - Weiß nicht“), zeigt sich bereits in der impliziten Bedingung eine deutliche Aktivierung des frontomedianen Kortex, während sich die temporoparietale Aktivierung auf den impliziten Charakter des Urteils zurückverfolgen lässt (cohim>cohex).

Während sich die frontalen Sprachareale und das frontomediane Kohärenz-Erkennungsmuster also primär auf die Beurteilung von semantischer Kohärenz zurückführen liessen, ergab der Vergleich der impliziten Bedingung als Modell für intuitive Wahrnehmungsprozesse folgende Unterschiede: Im Vergleich zur expliziten Bedingung (cohim>cohex) zeigte sich beim impliziten Erkennen von Kohärenz eine differentielle Aktivierung des heteromodalen Assoziationskortex, bestehend aus beidseitig inferior parietalen Arealen und dem rechten STS, wobei der linke parietale Kortex bereits während der Analyse des Stimulusmaterials aktiv war und zum Zeitpunk des Kohärenzurteils von einer rechtsseitigen parietalen Aktivierung und Aktivität im Bereich des rechten STS abgelöst wurde. Im Gegensatz dazu resultierte die explizite Bedingung in einer signifikanten Mehraktivierung des rechten Gyrus parahippocampalis, der Basalganglien (v.a. Nucleus caudatus und Putamen rechts), des Gyrus cinguli, der oberen Vierhügelplatte und des vorderen Gyrus frontalis inferior.

In Bezug auf den inhaltlichen Aspekt der Aufgabe, also die Frage „Was“ entschieden wurde, lässt sich festhalten, dass die Evaluation und Beurteilung von semantischer Kohärenz im wesentlichen auf der Aktivierung eines präfrontalen Netzwerkes aus beidseitigen frontolateralen Sprachарealen und einer frontomedianen Aktivierung beruht. Dabei scheint der prä-supplementär motorische Kortex die entscheidende Rolle beim Erkennen von Kohärenz zu spielen, während die frontolaterale Aktivierung im Bereich des Gyrus frontalis inferior mit der eigentlichen sprachlichen Analyse und Suche nach dem geeigneten Lösungswort korreliert.

Dahingegen zeigen die prozessbezogenen Kontraste, also die Darstellung dessen „Wie“ die Entscheidung zustande kam, eine Mehraktivierung des parietalen Assoziationskortex und des rechten STS für die implizite Bedingung, wohingegen das explizite Erkennen von Kohärenz im wesentlichen mit einer zusätzlichen Aktivierung des rechten Gyrus parahippocampalis, der Basalganglien und des linken Gyrus frontalis inferior einher geht.

Das Aktivierungsmuster der Gesamtaufgabe mit einer frontomedianen und frontolateralen präfrontalen Aktivierung steht im Einklang mit der neuroanatomischen und bildgebenden Literatur. Zahlreiche klinische, neuropathologische und bildgebende Studien weisen darauf hin, dass der IFG nicht nur am Sprachausdruck beteiligt ist, sondern auch eine entscheidende Rolle beim Sprachverständnis spielt, wie bei der Analyse komplexer syntaktischer Strukturen und der Bearbeitung semantischer Aufgaben. Der direkte Vergleich der vorliegenden Ergebnisse mit einer Metaanalyse funktionell bildgebender Studien semantischer Aufgaben zeigt eine deutliche Übereinstimmung im Bereich des vorderen IFG. Die Daten der diskutierten Studien und Ergebnisse des vorliegenden Experiments deuten darauf hin, dass der Gyrus frontalis inferior eine zentrale Rolle bei der Analyse semantischer Information einnimmt, wobei dem vorderen Anteil des IFG eine besondere Funktion bei der Koordination und Assoziation verschiedener Begriffe zukommt. Dass sich die Aktivierung des linken IFG in der zeitlichen Modellierung auf die Analyse des Wortmaterials zurückführen lässt, während die Aktivierung des rechten IFG eher mit der Suche nach einem geeigneten Lösungswort korreliert, steht in Übereinstimmung mit der Annahme, dass die linke Hemisphäre eher auf primärsprachliche Aspekte, d.h. die phonologische, syntaktische und semantische Analyse spezialisiert ist, während die rechte Hemisphäre eher assoziative Sprachaspekte wahrzunehmen scheint.

Das Erkennen von Kohärenz resultierte in einer Aktivierung des prä-supplementär motorischen Kortex, dessen Rolle bei der Ausführung motorischer Aufgaben lange bekannt ist. In Zusammenschau mit anderen Entscheidungsaufgaben weisen die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass der prä-supplementär motorische Kortex ganz allgemein für die Koordination und Evaluation konkurrierender Informationen zuständig scheint, wobei konkurrierende afferente Information eher im hinteren Teil, konkurrierende efferente Signale offensichtlich eher im vorderen Teil des prä-SMA prozessiert werden, was mit der beobachteten posterior-anterioren Verlagerung der Aktivierung übereinstimmt. Die Tatsache, dass das präfrontale Kohärenzerkennungsmuster bereits in der impliziten Bedingung voll ausgeprägt ist, kann als Bestätigung der Annahme interpretiert werden, dass implizites und explizites Erkennen von Kohärenz primär auf den gleichen neuronalen Mechanismen beruht, diese jedoch im Falle der impliziten Wahrnehmung nicht ausreichen, um eine Lösung zu explizieren. Dass unabhängig von der Lösung bereits implizites Wissen um den Zusammenhang der Begriffe existiert, deutet auf einen im frontomedianen Kortex lokalisierten subliminalen Wahrnehmungsprozess hin, welcher die Kohärenz der durch externe Information angeregten semantischen Repräsentationen der Begriffe wahrnimmt und so die Suche nach einem geeigneten Lösungswort dirigiert. Mit ihren weitreichenden transkortikalen Verknüpfungen scheint die Architektur des frontomedianen Kortex ideal für die Evaluation und Koordination verbreiteter neuronaler Aktivierung geeignet.

Ein tieferer Einblick in den Prozess der Wahrnehumg semantischer Kohärenz ergibt sich aus dem Vergleich der impliziten und expliziten Bedingung. Die differentielle Aktivierung des temporoparietalen Assoziationskortex in der impliziten Bedingung deutet darauf hin, dass die intuitive Wahrnehmung von Zusammenhängen auf einer weitgefächerten assoziativen Verknüpfung der wahrgenommenen Information beruht, welche ihrer Natur nach nicht einfach expliziert werden kann. Dahingegen resultiert die Wahrnehmung enger miteinander verknüpfter Begriffe mutmaßlich in einer höheren Überlappung korrespondierender semantischer Felder, welche als konkretes Konstrukt wahrgenommen und so expliziert werden können. Hinweise auf den Mechanismus dieses Wahrnehmungsprozesses ergeben sich aus der Analyse der expliziten Bedingung. Neben der beschriebenen frontomedianen Aktivierung findet sich hier eine zusätzliche Aktivierung des rechten parahippokampalen Gyrus, dessen Rolle beim Wortgedächtnis bekannt ist. Man kann also annehmen, dass die Präsentation der gezeigten Begriffe zunächst in einer bottom-

up Aktivierung entsprechender semantischer Assoziationsfelder resultiert (parietaler Assoziationskortex, verknüpft über den STS), die je nach Grad der Überlappung in der Aktivierung einer gemeinsamen semantischen Einheit konvergiert. Die Wahrnehmung eines konkreten semantischen Konstrukts führt schließlich zu einer Abfrage des Wortgedächtnis (Gyrus parahippocampalis) und nachfolgenden Aktivierung der entsprechenden kortikalen Sprachareale (Gyrus frontalis inferior).

Die signifikante Mehraktivierung des parietalen Assoziationskortex und STS, die sich durch ihre weitreichenden transkortikalen Verknüpfungen auszeichnen, wird als Bestätigung der vorgestellten Annahme interpretiert, dass intuitive Wahrnehmungs-Phänomene primär auf der impliziten Wahrnehmung der Kohärenz von, durch die dargebotene Information aktivierten, neuronalen Netzwerken beruht. Der Vergleich der impliziten und expliziten Bedingung zeigt eine frühe Aktivierung parietaler assoziativer Areale, die der frontalen Aktivierung, welche mit dem eigentlichen Erkennen von Kohärenz korreliert, vorausgeht. Dementsprechend liesse sich die frühe parietale Aktivierung im Sinne einer allgemeinen passiven assoziativen Evaluation der Begriffe deuten, während die frontomediane Aktivierung, insbesondere des prä-supplementär motorischen Kortex, einem quantitativen Kohärenz-Monitoring entsprechen würde. Übersteigt das wahrgenommene Muster eine gewisse neuronale „Prägnanz“, kann das entsprechende Konstrukt mit vergleichbaren Gedächtnisinhalten verglichen und schließlich expliziert werden.

Auch wenn die vorliegenden Ergebnisse einen assoziativen, musterartigen Charakter von intuitiven Wahrnehmungsprozessen nahe legen, bleibt das durchgeführte Experiment letztlich nur ein Beispiel, anhand dessen in einem weitestgehend kontrollierten Versuchsaufbau implizite und explizite Wahrnehmungsprozesse verglichen werden. Um einzelne Versuchsbedingungen sinnvoll mit fMRT vergleichen zu können, erscheint eine strenge Fokussierung auf ein beispielhaftes Paradigma im Moment unumgänglich. Weitere Studien mit variierten Stimulusqualitäten sind nötig, um genau zu differenzieren, welcher Anteil der beobachteten Aktivierung auf den Anforderungen der dargebotenen Stimuli beruht und welcher Teil sich letztlich stimulusunabhängig auf den intuitiven Charakter des Urteils zurückführen lässt – im Sinne von Intuition als einer integrierten, musterartigen Wahrnehmung der Kohärenz von durch die dargebotene Information aktivierten neuronalen Repräsentationen.

6 Literaturverzeichnis

Abdullaev, Y. G., N. P. Bechtereva, et al. (1998). “Neuronal activity of human caudate nucleus and prefrontal cortex in cognitive tasks”. Behav Brain Res 97(1-2): 159-77

Abdullaev, Y. G. and K. V. Melnichuk (1997). “Cognitive operations in the human caudate nucleus”. Neurosci Lett 234(2-3): 151-5

Ackermann, H., S. Graber, et al. (1997). “Categorical speech perception in cerebellar disorders”. Brain Lang 60(2): 323-31

Ackermann, H., S. Graber, et al. (1999). “Cerebellar contributions to the perception of temporal cues within the speech and nonspeech domain”. Brain Lang 67(3): 228-41

Ackermann, H., S. Graber, et al. (1999). “Phonemic vowel length contrasts in cerebellar disorders”. Brain Lang 67(2): 95-109

Ackermann, H., D. Wildgruber, et al. (1998). “Does the cerebellum contribute to cognitive aspects of speech production? A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study in humans”. Neurosci Lett 247(2-3): 187-90

Adolphs, R. (1999). “Social cognition and the human brain”. Trends Cogn Sci 3(12): 469-479

Adolphs, R., D. Tranel, et al. (1998). “The human amygdala in social judgment”. Nature 393(6684): 470-4

Adolphs, R., D. Tranel, et al. (1995). “Fear and the human amygdala”. J Neurosci 15(9): 5879-91

Akkal, D., B. Bioulac, et al. (2002). “Comparison of neuronal activity in the rostral supplementary and cingulate motor areas during a task with cognitive and motor demands”. Eur J Neurosci 15(5): 887-904

Akshoomoff, N. A., E. Courchesne, et al. (1992). “Contribution of the cerebellum to neuropsychological functioning: evidence from a case of cerebellar degenerative disorder”. Neuropsychologia 30(4): 315-28

Alexander, M. P., M. A. Naeser, et al. (1990). “Broca's area aphasias: aphasia after lesions including the frontal operculum”. Neurology 40(2): 353-62

Allison, T., A. Puce, et al. (2000). “Social perception from visual cues: role of the STS region”. Trends Cogn Sci 4(7): 267-278

Allman, J. M., A. Hakeem, et al. (2001). “The anterior cingulate cortex. The evolution of an interface between emotion and cognition”. Ann N Y Acad Sci 935: 107-17

Ambady, N. and R. Rosenthal (1993). “Half a minute: Predicting teacher evaluations from thin slices of nonverbal behavior and physical attractiveness”. Journal of Personality and Social Psychology 64: 431-441

Anderson, J. R. (1983). “A spreading activation theory of memory”. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior 22: 261-295

Anderson, J. R. and P. L. Pirolli (1984). “Spread of activation”. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 10: 791-798

Anderson, S. W., A. Bechara, et al. (1999). “Impairment of social and moral behavior related to early damage in human prefrontal cortex”. Nat Neurosci 2(11): 1032-7

Anderson, S. W., H. Damasio, et al. (1991). “Wisconsin Card Sorting Test performance as a measure of frontal lobe damage”. J Clin Exp Neuropsychol 13(6): 909-22

Arthurs, O. J., E. J. Williams, et al. (2000). “Linear coupling between functional magnetic resonance imaging and evoked potential amplitude in human somatosensory cortex”. Neuroscience 101(4): 803-6

Ashby, F. G., L. A. Alfonso-Reese, et al. (1998). “A neuropsychological theory of multiple systems in category learning”. Psychol Rev 105(3): 442-81

Attwell, D. and C. Iadecola (2002). “The neural basis of functional brain imaging signals”. Trends Neurosci 25(12): 621-5

Awh, E. and W. J. Gehring (1999). “The anterior cingulate cortex lends a hand in response selection”. Nat Neurosci 2(10): 853-4

Bachevalier, J., M. Meunier, et al. (1997). “Thalamic and temporal cortex input to medial prefrontal cortex in rhesus monkeys”. Exp Brain Res 115(3): 430-44

Baron-Cohen, S., O. R. M, et al. (1999). “Recognition of faux pas by normally developing children and children with Asperger syndrome or high-functioning autism”. J Autism Dev Disord 29(5): 407-18

Barr, J. A. and R. E. Kleck (1995). “Self-other perception of the intensity of facial expressions of emotions: Do we know what we show?”. Journal of Personality and Social Psychology 68(608-618)

Baxter, L. C., A. J. Saykin, et al. (2003). “Sex differences in semantic language processing: A functional MRI study”. Brain Lang 84(2): 264-72

Bechara, A., A. R. Damasio, et al. (1994). “Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex”. Cognition 50(1-3): 7-15

Bechara, A., D. Tranel, et al. (1996). “Failure to respond autonomically to anticipated future outcomes following damage to prefrontal cortex”. Cereb Cortex 6(2): 215-25

Benecke, R., J. C. Rothwell, et al. (1987). “Disturbance of sequential movements in patients with Parkinson's disease”. Brain 110(Pt 2): 361-79

Benke, T., S. Bosch, et al. (1998). “A study of emotional processing in Parkinson's disease”. Brain Cogn 38(1): 36-52

Bergson, H. (1941). La pensee et le mouvant - Essais et conferences. Presses universitaires de France, Paris

Berns, G. S., J. D. Cohen, et al. (1997). “Brain regions responsive to novelty in the absence of awareness”. Science 276(5316): 1272-5

Birbaumer, N., W. Grodd, et al. (1998). “fMri reveals amygdala activation to human faces in social phobics”. Neuroreport 9(6): 1223-6

Birn, R. M., P. A. Bandettini, et al. (1998). “Magnetic field changes in the human brain due to swallowing or speaking”. Magn Reson Med 40(1): 55-60

Birn, R. M., P. A. Bandettini, et al. (1999). “Event-related fMRI of tasks involving brief motion”. Hum Brain Mapp 7(2): 106-14

Birn, R. M., R. W. Cox, et al. (2002). “Detection versus estimation in event-related fMRI: choosing the optimal stimulus timing”. Neuroimage 15(1): 252-64

Blair, R. J. and L. Cipolotti (2000). “Impaired social response reversal. A case of 'acquired sociopathy'”. Brain 123(Pt 6): 1122-41

Blakemore, S. J., P. Fonlupt, et al. (2001). “How the brain perceives causality: an event-related fMRI study”. Neuroreport 12(17): 3741-6

Bloch, F. (1946). “Nuclear Induction”. Physical Review 70: 460-474

Bloch, F., W. W. Hansen, et al. (1946). “Nuclear Induction”. Physical Review 69(127)

Bloedel, J. R. and V. Bracha (1997). “Duality of cerebellar motor and cognitive functions”. Int Rev Neurobiol 41: 613-34

Bolte, A. (1999). Intuition und Emotion: Einflüsse von Stimmungen auf semantische Aktivierung und implizite Urteilsprozesse. Fachbereich Psychologie. Osnabrück, Universität Osnabrück

Bolte, A., T. Goschke, et al. (2003). “Emotion and intuition: Effects of positive and negative mood on implicit judgements of semantic coherence”. Psychological Science

Bookheimer, S. (2002). “Functional MRI of Language: New Approaches to Understanding the Cortical Organization of Semantic Processing”. Annu Rev Neurosci 25: 151-88

Bookheimer, S., T. Zeffiro, et al. (1995). “Regional cerebral blood flow changes during object naming and word reading”. Hum Brain Mapp 3: 93-106

Bottini, G., R. Corcoran, et al. (1994). “The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study”. Brain 117(Pt 6): 1241-53

Bower, J. M. (1997). “Control of sensory data acquisition”. Int Rev Neurobiol 41: 489-513

Bower, J. M. (2002). “The organization of cerebellar cortical circuitry revisited: implications for function”. Ann N Y Acad Sci 978: 135-55

Bowers, K. S., G. Regehr, et al. (1990). “Intuition in the Context of Discovery”. Cognitive PSychology 22: 72-110

Bracha, V., L. Zhao, et al. (2000). “The human cerebellum and associative learning: dissociation between the acquisition, retention and extinction of conditioned eyeblinks”. Brain Res 860(1-2): 87-94

Bradshaw, J. L. and N. C. Nettleton (1981). “On the nature of hemispheric specialisation”. Behavioral and Brain Sciences 4: 51-91

Broca, P. (1861). “Remarques sur le siége de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie”. Bulletins de la société anatomique de Paris année 36(2ème serie, tome 6): 330-357

Buccino, G., F. Binkofski, et al. (2001). “Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study”. Eur J Neurosci 13(2): 400-404

Buchanan, T. W., K. Lutz, et al. (2000). “Recognition of emotional prosody and verbal components of spoken language: an fMRI study”. Brain Res Cogn Brain Res 9(3): 227-38

Buckner, R. L., W. Koutstaal, et al. (2000). “Functional MRI evidence for a role of frontal and inferior temporal cortex in amodal components of priming”. Brain 123 Pt 3: 620-40

Buitelaar, J. K., M. van der Wees, et al. (1999). “Theory of mind and emotion-recognition functioning in autistic spectrum disorders and in psychiatric control and normal children”. Dev Psychopathol 11(1): 39-58

Burruss, J. W., R. A. Hurley, et al. (2000). “Functional neuroanatomy of the frontal lobe circuits”. Radiology 214(1): 227-30

Bush, G., B. A. Vogt, et al. (2002). “Dorsal anterior cingulate cortex: a role in reward-based decision making”. Proc Natl Acad Sci U S A 99(1): 523-8

Bushara, K. O., T. Hanakawa, et al. (2003). “Neural correlates of cross-modal binding”. Nat Neurosci 6(2): 190-5

Caine, E. D., R. D. Hunt, et al. (1978). “Huntington's dementia. Clinical and neuropsychological features”. Arch Gen Psychiatry 35(3): 377-84

Calhoun, V. D., T. Adali, et al. (2002). “Independent component analysis of fMRI data in the complex domain”. Magn Reson Med 48(1): 180-92

Calvert, G. A. (2001). “Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies”. Cereb Cortex 11(12): 1110-23

Calvert, G. A., R. Campbell, et al. (2000). “Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex”. Curr Biol 10(11): 649-57

Calvert, G. A., P. C. Hansen, et al. (2001). “Detection of audio-visual integration sites in humans by application of electrophysiological criteria to the BOLD effect”. Neuroimage 14(2): 427-38

Cameron, K. A., S. Yashar, et al. (2001). “Human hippocampal neurons predict how well word pairs will be remembered”. Neuron 30(1): 289-98

Cancellier, A. E. and A. Kertesz (1990). “Lesion localization in acquired deficits of emotional expression and comprehension”. Brain & Cognition 13: 133-147

Canli, T., J. E. Desmond, et al. (1998). “Hemispheric asymmetry for emotional stimuli detected with fMRI”. Neuroreport 9(14): 3233-9

Caplan, R. and M. Dapretto (2001). “Making sense during conversation: an fMRI study”. Neuroreport 12(16): 3625-32

Castelli, F., F. Happe, et al. (2000). “Movement and mind: a functional imaging study of perception and interpretation of complex intentional movement patterns”. Neuroimage 12(3): 314-25

Chow, T. W. and J. L. Cummings (1999). Frontal-Subcortical Circuits. The Human Frontal Lobes. B. L. Miller and J. L. Cummings. New York, London, The Guilford Press

Cohen, N. J. and L. R. Squire (1980). “Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: dissociation of knowing how and knowing that”. Science 210(4466): 207-10

Collins, A. M. and E. F. Loftus (1975). “A spreading-activation theory of semantic processing”. Psychological Review 82: 407-428

Coney, J. (2002). “Lateral asymmetry in phonological processing: relating behavioral measures to neuroimaged structures”. Brain Lang 80(3): 355-65

Critchley, H. D., R. Elliott, et al. (2000). “Neural activity relating to generation and representation of galvanic skin conductance responses: a functional magnetic resonance imaging study”. J Neurosci 20(8): 3033-40

Crosson, B., J. R. Sadek, et al. (2001). “Relative shift in activity from medial to lateral frontal cortex during internally versus externally guided word generation”. J Cogn Neurosci 13(2): 272-83

Culham, J. C. and N. G. Kanwisher (2001). “Neuroimaging of cognitive functions in human parietal cortex”. Curr Opin Neurobiol 11(2): 157-63

Cunnington, R., C. Windischberger, et al. (2002). “The preparation and execution of self-initiated and externally- triggered movement: a study of event-related fMRI”. Neuroimage 15(2): 373-85

Damadian, R. (1971). “Tumor detection by nuclear magnetic resonance”. Science 171: 1151-3

Damadian, R. (1977). “Nuclear magnetic resonance: a noninvasive approach to cancer”. Hosp Pract 12: 63-70

Damadian, R., M. Goldsmith, et al. (1977). “NMR in cancer: XVI. FONAR image of the live human body”. Physiol Chem Phys 9(1): 97-100

Damasio, A. R. (1995). “On some functions of the human prefrontal cortex”. Ann N Y Acad Sci 769: 241-51

Damasio, A. R. (1996). “The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex”. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 351(1346): 1413-20

Damasio, A. R., D. Tranel, et al. (1990). “Individuals with sociopathic behavior caused by frontal damage fail to respond autonomically to social stimuli”. Behav Brain Res 41(2): 81-94

Damasio, H., T. Grabowski, et al. (1994). “The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient”. Science 264(5162): 1102-5

de Quervain, D. J., K. Henke, et al. (2003). “Glucocorticoid-induced impairment of declarative memory retrieval is associated with reduced blood flow in the medial temporal lobe”. Eur J Neurosci 17(6): 1296-302

Decety, J. and T. Chaminade (2003). “Neural correlates of feeling sympathy”. Neuropsychologia 41(2): 127-38

Demonet, J. F., F. Chollet, et al. (1992). “The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects”. Brain 115(Pt 6): 1753-68

DePaulo, B. (1992). “Nonverbal behavior and self-representation”. Psychological Bulletin 111: 203-243

Devine, P. G. (1989). “Stereotypes and prejudice: Their automatic and controlled components”. Journal of Personality and Social Psychology 56: 680-690

Doherty, J. O., E. T. Rolls, et al. (2000). “Sensory-specific satiety-related olfactory activation of the human orbitofrontal cortex”. Neuroreport 11(2): 399-403

Dominey, P. F., J. Ventre-Dominey, et al. (1996). “Analogical transfer is effective in a serial reaction time task in Parkinson's disease: Evidence for a dissociable form of sequence learning”. Neuropsychologia 35: 1-9

Doya, K. (2000). “Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control”. Curr Opin Neurobiol 10(6): 732-9

Dreher, J. C. and J. Grafman (2003). “Dissociating the roles of the rostral anterior cingulate and the lateral prefrontal cortices in performing two tasks simultaneously or successively”. Cereb Cortex 13(4): 329-39

Duus, P. (1995). Neurologisch-topische Diagnostik. Thieme, Stuttgart, New York

Edwards, K. (1998). “The face of time: Temporal cues in facial expressions of emotions”. Psychological Science 9: 270-276

Eichenbaum, H. (2000). “A cortical-hippocampal system for declarative memory”. Nat Rev Neurosci 1(1): 41-50

Ekman, P. and W. V. Friesen (1969). “Nonverbal leakage and clues to deception”. Psychiatry 32(1): 88-106

Elliott, R. and R. J. Dolan (1998). “Activation of different anterior cingulate foci in association with hypothesis testing and response selection”. Neuroimage 8(1): 17-29

Elliott, R. and R. J. Dolan (1998). “Neural response during preference and memory judgments for subliminally presented stimuli: a functional neuroimaging study”. J Neurosci 18(12): 4697-704

Elliott, R., G. Rees, et al. (1999). “Ventromedial prefrontal cortex mediates guessing”. Neuropsychologia 37(4): 403-11

Esposito, F., E. Formisano, et al. (2002). “Spatial independent component analysis of functional MRI time-series: to what extent do results depend on the algorithm used?”. Hum Brain Mapp 16(3): 146-57

Fadiga, L., L. Fogassi, et al. (1995). “Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study”. J Neurophysiol 73(6): 2608-11

Farrer, C., N. Franck, et al. (2003). “Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study”. Neuroimage 18(2): 324-33

Farrer, C. and C. D. Frith (2002). “Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: the neural correlates of the experience of agency”. Neuroimage 15(3): 596-603

Ferstl, E. C. and D. Y. von Cramon (2002). “What does the frontomedian cortex contribute to language processing: coherence or theory of mind?”. Neuroimage 17(3): 1599-612

Flavell, J. H. (1999). “Cognitive development: children's knowledge about the mind”. Annu Rev Psychol 50(2): 21-45

Fletcher, P. C., F. Happe, et al. (1995). “Other minds in the brain: a functional imaging study of "theory of mind" in story comprehension”. Cognition 57(2): 109-28

Formisano, E., D. E. Linden, et al. (2002). “Tracking the mind's image in the brain I: time-resolved fMRI during visuospatial mental imagery”. Neuron 35(1): 185-94

Fox, P. and M. E. Raichle (1986). “Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects”. Proc Natl Acad Sci 83: 1140-1144

Francis, S., E. T. Rolls, et al. (1999). “The representation of pleasant touch in the brain and its relationship with taste and olfactory areas”. Neuroreport 10(3): 453-9

Friston, K., A. Holmes, et al. (1995). “Statistical Parametric Maps in Functional Imaging: A General Linear Approach”. Human Brain Mapping 2: 189-210

Frith, C. D. and R. Corcoran (1996). “Exploring 'theory of mind' in people with schizophrenia”. Psychol Med 26(3): 521-30

Frith, C. D. and U. Frith (1999). “Interacting minds--a biological basis”. Science 286(5445): 1692-5

Frith, U. and C. D. Frith (2003). “Development and neurophysiology of mentalizing”. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 358(1431): 459-73

Frost, J. A., J. R. Binder, et al. (1999). “Language processing is strongly left lateralized in both sexes. Evidence from functional MRI”. Brain 122(Pt 2): 199-208

Fujii, T., J. Okuda, et al. (1997). “Different roles of the left and right parahippocampal regions in verbal recognition: a PET study”. Neuroreport 8(5): 1113-7

Fulbright, R. K., A. R. Jenner, et al. (1999). “The cerebellum's role in reading: a functional MR imaging study”. AJNR Am J Neuroradiol 20(10): 1925-30

Furmark, T., H. Fischer, et al. (1997). “The amygdala and individual differences in human fear conditioning”. Neuroreport 8(18): 3957-60

Gabrieli, J. D., R. A. Poldrack, et al. (1998). “The role of left prefrontal cortex in language and memory”. Proc Natl Acad Sci U S A 95(3): 906-13

Gallagher, H. L., F. Happe, et al. (2000). “Reading the mind in cartoons and stories: an fMRI study of 'theory of mind' in verbal and nonverbal tasks”. Neuropsychologia 38(1): 11-21

Gallese, V., L. Fadiga, et al. (1996). “Action recognition in the premotor cortex”. Brain 119(Pt 2)(2): 593-609

Gallese, V. and A. Goldman (1998). “Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading”. Trends Cogn Sci 2(12): 493-501

Gasparini, M., V. Di Piero, et al. (1999). “Linguistic impairment after right cerebellar stroke: a case report”. Eur J Neurol 6(3): 353-6

Gilbert, D. T. and P. S. Malone (1995). “The correspondence bias”. Psychol Bull 117(1): 21-38

Gitelman, D. R., T. B. Parrish, et al. (2002). “Functional anatomy of visual search: regional segregations within the frontal eye fields and effective connectivity of the superior colliculus”. Neuroimage 15(4): 970-82

Goel, V., J. Grafman, et al. (1995). “Modeling other minds”. Neuroreport 6(13): 1741-6

Grammer, K., K. B. Kruck, et al. (1998). “The courtship dance: patterns of non-verbal synchronisation in opposite sex-encounters”. Journal of Non-Verbal Behavior 22(1): 3-29

Gray, J. M., A. W. Young, et al. (1997). “Impaired recognition of disgust in Huntington's disease gene carriers”. Brain 120(Pt 11): 2029-38

Gray, J. R. (2001). “Emotional modulation of cognitive control: Approach-withdrawal states double dissociate spatial from verbal 2-back task performance.”. Journal of Experimental Psychology: General 130: 436-452

Grossman, M., E. E. Smith, et al. (2002). “The neural basis for categorization in semantic memory”. Neuroimage 17(3): 1549-61

Hadland, K. A., M. F. Rushworth, et al. (2003). “The anterior cingulate and reward-guided selection of actions”. J Neurophysiol 89(2): 1161-4

Hadland, K. A., M. F. Rushworth, et al. (2003). “The effect of cingulate lesions on social behaviour and emotion”. Neuropsychologia 41(8): 919-31

Hanakawa, T., M. Honda, et al. (2002). “The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: an integrative neuroimaging approach”. Cereb Cortex 12(11): 1157-70

Happe, F., S. Ehlers, et al. (1996). “'Theory of mind' in the brain. Evidence from a PET scan study of Asperger syndrome”. Neuroreport 8(1): 197-201

Happe, F., G. S. Malhi, et al. (2001). “Acquired mind-blindness following frontal lobe surgery? A single case study of impaired 'theory of mind' in a patient treated with stereotactic anterior capsulotomy”. Neuropsychologia 39(1): 83-90

Harlow, J. M. (1848). “Recovery from the passage of an iron bar through the head”. Publications of the Massachussetts Medical Society 2: 327-347

Harlow, J. M. (1868). “Passage of an iron rod through the head”. Boston Medical and Surgical Journal(39): 389

Heckers, S., A. P. Weiss, et al. (2002). “Hippocampal and brain stem activation during word retrieval after repeated and semantic encoding”. Cereb Cortex 12(9): 900-7

Heider, F. and M. Simmel (1944). “An experimental study of apperent behavior”. Am J Psychol 57: 243-259

Heit, G., M. E. Smith, et al. (1988). “Neural encoding of individual words and faces by the human hippocampus and amygdala”. Nature 333(6175): 773-5

Henke, K., C. R. Mondadori, et al. (2003). “Nonconscious formation and reactivation of semantic associations by way of the medial temporal lobe”. Neuropsychologia 41(8): 863-76

Hermsdorfer, J., G. Goldenberg, et al. (2001). “Cortical correlates of gesture processing: clues to the cerebral mechanisms underlying apraxia during the imitation of meaningless gestures”. Neuroimage 14(1 Pt 1): 149-61

Hornak, J., E. T. Rolls, et al. (1996). “Face and voice expression identification in patients with emotional and behavioural changes following ventral frontal lobe damage”. Neuropsychologia 34(4): 247-61

Houk, J. C., J. L. Adams, et al. (1995). A model of how the basal ganglia generate and use neural signals that predict reinforcement. Models of information processing in the basal ganglia. J. C. Houk, J. L. Davis and D. G. Beiser. Cambridge, MA, MIT Press: 249-270

Huang, J., T. H. Carr, et al. (2002). “Comparing cortical activations for silent and overt speech using event-related fMRI”. Hum Brain Mapp 15(1): 39-53

Hügli, A. and P. Lübcke, Eds. (1991). Philosophie Lexikon. Hamburg, Rowohlt

Husserl, E. (1910). Philosophie als strenge Wissenschaft. Klostermann, Frankfurt am Main

Hyder, F., D. L. Rothman, et al. (1997). “Oxidative glucose metabolism in rat brain during single forepaw stimulation: a spatially localized 1H[13C] nuclear magnetic resonance study”. J Cereb Blood Flow Metab 17(10): 1040-7

Iacoboni, M., L. M. Koski, et al. (2001). “Reafferent copies of imitated actions in the right superior temporal cortex”. Proc Natl Acad Sci U S A 98(24): 13995-9

Isen, A. M., K. A. Daubman, et al. (1987). “Positive affect facilitates creative problem solving”. Journal of Personality and Social Psychology 52: 1122-1131

Isen, A. M., M. M. S. Johnson, et al. (1985). “The influence of positive affect on the unusualness of word associations”. Journal of Personality and Social Psychology 48: 1413-1426

Isen, A. M. and B. Means (1983). “The influence of positive affect on decision-making strategy”. Social Cognition 2: 18-31

Ishai, A., L. G. Ungerleider, et al. (2000). “The representation of objects in the human occipital and temporal cortex”. J Cogn Neurosci 12(Suppl 2): 35-51

Ishai, A., L. G. Ungerleider, et al. (1999). “Distributed representation of objects in the human ventral visual pathway”. Proc Natl Acad Sci U S A 96(16): 9379-84

Ivanitsky, A. M., A. R. Nikolaev, et al. (2001). “Cortical connectivity during word association search”. Int J Psychophysiol 42(1): 35-53

Ivry, R. B. and J. V. Baldo (1992). “Is the cerebellum involved in learning and cognition?”. Curr Opin Neurobiol 2(2): 212-6

Jacobs, D. H., J. Shuren, et al. (1995). “Impaired perception of facial identity and facial affect in Huntington's disease”. Neurology 45(6): 1217-8

Jenkins, I. H., D. J. Brooks, et al. (1994). “Motor sequence learning: a study with positron emission tomography”. J Neurosci 14(6): 3775-90

Jenkins, T. A., R. Dias, et al. (2002). “Changes in Fos expression in the rat brain after unilateral lesions of the anterior thalamic nuclei”. Eur J Neurosci 16(8): 1425-32

Jessen, F., S. Flacke, et al. (2001). “Encoding and retrieval related cerebral activation in continuous verbal recognition”. Brain Res Cogn Brain Res 12(2): 199-206

Jolliffe, T. and S. Baron-Cohen (1999). “The Strange Stories Test: a replication with high-functioning adults with autism or Asperger syndrome”. J Autism Dev Disord 29(5): 395-406

Jung, C. G. (1993). Typologie. dtv, München

Kahneman, D. and A. Tversky (1972). “Subjective probability: A judgment of representativeness”. Cognitive PSychology 3: 430-454

Kahneman, D. and A. Tversky (1982). “On the study of statistical intuitions”. Cognition 11(2): 123-41

Keele, S. W. and R. Ivry (1990). “Does the cerebellum provide a common computation for diverse tasks? A timing hypothesis”. Ann N Y Acad Sci 608: 179-207

Kensinger, E. A., R. J. Clarke, et al. (2003). “What neural correlates underlie successful encoding and retrieval? A functional magnetic resonance imaging study using a divided attention paradigm”. J Neurosci 23(6): 2407-15

Kent, G. H. and A. J. Rosanoff (1910). “A study of association in insanity”. American Journal of Insanity 67: 37-96

Kikyo, H., K. Ohki, et al. (2002). “Neural correlates for feeling-of-knowing: an fMRI parametric analysis”. Neuron 36(1): 177-86

Kikyo, H., K. Ohki, et al. (2001). “Temporal characterization of memory retrieval processes: an fMRI study of the "tip of the tongue" phenomenon”. Eur J Neurosci 14(5): 887-92

Kircher, T. T., M. Brammer, et al. (2001). “Engagement of right temporal cortex during processing of linguistic context”. Neuropsychologia 39(8): 798-809

Knowlton, B. J., J. A. Mangels, et al. (1996). “A neostriatal habit learning system in humans”. Science 273(5280): 1399-402

Knowlton, B. J., S. J. Ramus, et al. (1992). “Intact artificial grammar learning in amnesia: Dissociation of classification learning and explicit memory for specific instances”. Psychological Science 3: 172-179

Knowlton, B. J. and L. R. Squire (1996). “Artificial grammar learning depends on implicit acquisition of both abstract and exemplar-specific information”. J Exp Psychol Learn Mem Cogn 22(1): 169-81

Knowlton, B. J., L. R. Squire, et al. (1994). “Probabilistic classification learning in amnesia”. Learn Mem 1(2): 106-20

Knowlton, B. J., L. R. Squire, et al. (1996). “Dissociations within nondeclarative memory in HD”. Neuropsychology 10: 538-548

Krause, B. J., B. Horwitz, et al. (1999). "Network analysis in episodic encoding and retrieval of word-pair associates: a PET study". Eur J Neurosci 11(9): 3293-301

Kraut, M. A., S. Kremen, et al. (2002). "Object activation in semantic memory from visual multimodal feature input". J Cogn Neurosci 14(1): 37-47

Kraut, M. A., S. Kremen, et al. (2002). "Object activation from features in the semantic system". J Cogn Neurosci 14(1): 24-36

Krawczyk, D. C. (2002). "Contributions of the prefrontal cortex to the neural basis of human decision making". Neurosci Biobehav Rev 26(6): 631-64

Kuhl, J. (1983). "Emotion, Kognition und Motivation: II. Die funktionale Bedeutung der Emotionen für das problemlösende Denken und für das konkrete Handeln". Sprache und Kognition 4: 228-253

Kuhl, J. (2000). A functional-design approach to motivation and self-regulation: The dynamics of personality systems interactions. Handbook of self-regulation. M. Boekaerts, P. R. Pintrich and M. Zeidner. San Diego, Academic Press: 111-169

Kumar, A., D. Welti, et al. (1975). "NMR Fourier zeugmatography". J. Magn. Reson 18: 69-83

Kunda, Z. and P. Thagard (1996). "Forming impressions from stereotypes, traits, and behaviors: A parallel-constraint-satisfaction theory". Psychological Review 103: 284-308

Kunst-Wilson and Zajonc (1980). "Affective discrimination of stimuli that can not be recognized". Science 207: 557-558

Lane, R. D., E. M. Reiman, et al. (1997). "Neuroanatomical correlates of happiness, sadness, and disgust". Am J Psychiatry 154(7): 926-33

Lane, R. D., E. M. Reiman, et al. (1997). "Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion". Neuropsychologia 35(11): 1437-44

Lauterbur, P. C. (1973). "Image Formation by induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance". Nature 242: 190-191

Leiner, H. C. and A. L. Leiner (1997). "How fibers subserve computing capabilities: similarities between brains and machines". Int Rev Neurobiol 41: 535-53

Leiner, H. C., A. L. Leiner, et al. (1989). "Reappraising the cerebellum: what does the hindbrain contribute to the forebrain?". Behav Neurosci 103(5): 998-1008

Leiner, H. C., A. L. Leiner, et al. (1991). "The human cerebro-cerebellar system: its computing, cognitive, and language skills". Behav Brain Res 44(2): 113-28

Leiner, H. C., A. L. Leiner, et al. (1993). "Cognitive and language functions of the human cerebellum". Trends Neurosci 16(11): 444-7

Leonard, C. M., E. T. Rolls, et al. (1985). "Neurons in the amygdala of the monkey with responses selective for faces". Behav Brain Res 15(2): 159-76

Lewicki, P. (1986). Nonconscious social information processing. Academic Press, New York

Lewicki, P., M. Czyzewska, et al. (1987). "Unconscious acquisition of complex procedural knowledge". Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 13(523-530)

Lhermitte, F., B. Pillon, et al. (1986). "Human autonomy and the frontal lobes. Part I: Imitation and utilization behavior: a neuropsychological study of 75 patients". Ann Neurol 19(4): 326-34

Liebermann, M. D. (2000). “Intuition: A Social Cognitive Neuroscience Approach”. Psychological Bulletin 126(1): 109-137

Logothetis, N. K., J. Pauls, et al. (2001). “Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal”. Nature 412(6843): 150-7

Luria, A. (1966). The Higher Cortical Function in Man. Basic Books, New York

Mansfield, P. (1977). “Multi-Planar Image Formation using NMR Spin Echoes”. J. Phys. C. 10: 55-88

Mansfield, P. and A. A. Maudsley (1977). “Medical imaging by NMR”. Br J Radiol 50(591): 188-94

Mansfield, P., I. L. Pykett, et al. (1978). “Human whole body line-scan imaging by NMR”. Br J Radiol 51(611): 921-2

Manza, L. and A. S. Reber (1997). Representing artificial grammars: Transfer across stimulus forms and modalities. How implicit is implicit learning. D. Berry. New York, Oxford University Press: 73-106

Maril, A., J. S. Simons, et al. (2003). “Feeling-of-knowing in episodic memory: an event-related fMRI study”. Neuroimage 18(4): 827-36

Mathiak, K., I. Hertrich, et al. (2002). “Cerebellum and speech perception: a functional magnetic resonance imaging study”. J Cogn Neurosci 14(6): 902-12

Mayring, P. (2000). “Qualitative Textanalyse”. Forum Qualitative Sozialforschung (Online) 1(2)

McClelland, J. L., B. L. McNaughton, et al. (1995). “Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory”. Psychol Rev 102(3): 419-57

McDermott, K. B., J. G. Ojemann, et al. (1999). “Direct comparison of episodic encoding and retrieval of words: an event- related fMRI study”. Memory 7(5-6): 661-78

Mechelli, A., M. L. Gorno-Tempini, et al. (2003). “Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies, and limitations”. J Cogn Neurosci 15(2): 260-71

Mednick, S. A. (1962). “The associative basis of the creative process”. Psychological Review 69: 220-232

Mednick, S. A. and M. T. Mednick (1967). Examiner's manual: Remote Associates Test. Houghton Mifflin, Boston

Mendez, M. F., N. L. Adams, et al. (1989). “Neurobehavioral changes associated with caudate lesions”. Neurology 39(3): 349-54

Meyer, T., P. I. Hanson, et al. (1992). “Calmodulin trapping by calcium-calmodulin-dependent protein kinase”. Science 256(5060): 1199-202

Middleton, F. A. and P. L. Strick (1997). “Cerebellar output channels”. Int Rev Neurobiol 41: 61-82

Middleton, F. A. and P. L. Strick (2000). “Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits”. Brain Res Brain Res Rev 31(2-3): 236-50

Middleton, F. A. and P. L. Strick (2001). “Cerebellar projections to the prefrontal cortex of the primate”. J Neurosci 21(2): 700-12

Middleton, F. A. and P. L. Strick (2002). “Basal-ganglia 'projections' to the prefrontal cortex of the primate”. Cereb Cortex 12(9): 926-35

Miezin, F. M., L. Maccotta, et al. (2000). “Characterizing the hemodynamic response: effects of presentation rate, sampling procedure, and the possibility of ordering brain activity based on relative timing”. Neuroimage 11(6 Pt 1): 735-59

Milner, B. (1963). “Effects of brain lesions on card sorting”. Arch Neurol 9: 90-100

Mishkin, M., B. Malamut, et al. (1984). Memories and habits: Two neural systems. Neurobiology of learning and memory. G. Lynch, J. L. McGaugh and N. M. Weinberger. New York, Guilford Press: 65-77

Mittelstraß, J., Ed. (1995). Enzyklopädie Philosophie und Naturwissenschaft. Stuttgart, J.B. Metzler

Morris, J. S., K. J. Friston, et al. (1998). “A neuromodulatory role for the human amygdala in processing emotional facial expressions”. Brain 121(Pt 1): 47-57

Morris, J. S., C. D. Frith, et al. (1996). “A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions”. Nature 383(6603): 812-5

Morris, J. S., A. Ohman, et al. (1999). “A subcortical pathway to the right amygdala mediating "unseen" fear”. Proc Natl Acad Sci U S A 96(4): 1680-5

Narumoto, J., T. Okada, et al. (2001). “Attention to emotion modulates fMRI activity in human right superior temporal sulcus”. Brain Res Cogn Brain Res 12(2): 225-31

Navon, D. (1977). “Forest before trees: The precedence of global features in visual perception”. Cognitive PSychology 9: 353-383

Nelson, H. E. (1976). “A modified card sorting test sensitive to frontal lobe defects”. Cortex 12(4): 313-24

Newman, S. D. and D. Twieg (2001). “Differences in auditory processing of words and pseudowords: an fMRI study”. Hum Brain Mapp 14(1): 39-47

Newman-Gage, H. and A. M. Graybiel (1988). “Expression of calcium/calmodulin-dependent protein kinase in relation to dopamine islands and synaptic maturation in the cat striatum”. J Neurosci 8(9): 3360-75

Nikolaev, A. R., G. A. Ivanitskii, et al. (2001). “Studies of cortical interactions over short periods of time during the search for verbal associations”. Neurosci Behav Physiol 31(2): 119-32

Nishitani, N., T. Nagamine, et al. (1998). “Modality-specific subregions in human inferior parietal lobule: a magnetoencephalographic study during cognitive tasks”. Neurosci Lett 252(2): 79-82

Noelle-Neumann, E. (2000). Heuchelei, Gesprächskultur und Schweigespirale. Ethik und Heuchelei. E. Ruhnau, S. Kridlo, B. Busch and K. Roessler. Köln, Forschungszentrum Jülich, Humanwissenschaftliches Zentrum der Ludwig-Maximilians-Universität München, Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland

Ogawa, S., T. M. Lee, et al. (1990). “Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields”. Magn Reson Med 14(1): 68-78

Ohnishi, T., H. Matsuda, et al. (2000). “Abnormal regional cerebral blood flow in childhood autism”. Brain 123(Pt 9): 1838-44

Ojemann, G., J. Ojemann, et al. (1989). “Cortical language localization in left, dominant hemisphere. An electrical stimulation mapping investigation in 117 patients”. J Neurosurg 71(3): 316-26

Oldfield, R. C. (1971). “The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory.”. Neuropsychologia 9(1): 79-113

Palmer, E. D., H. J. Rosen, et al. (2001). “An event-related fMRI study of overt and covert word stem completion”. Neuroimage 14(1 Pt 1): 182-93

Pan, J. W., D. T. Stein, et al. (2000). “Spectroscopic imaging of glutamate C4 turnover in human brain”. Magn Reson Med 44(5): 673-9

Pantel, J., B. Kratz, et al. (2003). “Parahippocampal volume deficits in subjects with aging-associated cognitive decline”. Am J Psychiatry 160(2): 379-82

Papez, J. W. (1937). “A proposed mechanism of emotion”. Archives of Neurology and Psychiatry 38: 725-743

Paulesu, E., D. Perani, et al. (2003). “A functional-anatomical model for lip-reading”. J Neurophysiol 15: 15

Pauling, L. and C. D. Coryell (1936). “The Magnetic Properties and Structure of Hemoglobin, Oxyhemoglobin and Carbonmonoxyhemoglobin”. Proc Natl Acad Sci 22: 210-216

Paulus, M. P., N. Hozack, et al. (2001). “Prefrontal, parietal, and temporal cortex networks underlie decision-making in the presence of uncertainty”. Neuroimage 13(1): 91-100

Perner, J. and B. Lang (1999). “Development of theory of mind and executive control”. Trends Cogn Sci 3(9): 337-344

Perrig, W. J., W. Wippich, et al. (1993). Unbewußte Informationsverarbeitung. Huber, Bern

Petersen, S. E., P. T. Fox, et al. (1988). “Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing”. Nature 331(6157): 585-9

Peterson, C. and L. R. Beach (1967). “Man as an Intuitive Stastitician”. Psychological Bulletin 68(1): 29-46

Phillips, M. D., M. J. Lowe, et al. (2001). “Temporal lobe activation demonstrates sex-based differences during passive listening”. Radiology 220(1): 202-7

Phillips, M. L., L. Williams, et al. (1999). “A differential neural response to threatening and non-threatening negative facial expressions in paranoid and non-paranoid schizophrenics”. Psychiatry Res 92(1): 11-31

Phillips, M. L., A. W. Young, et al. (1998). “Neural responses to facial and vocal expressions of fear and disgust”. Proc R Soc Lond B Biol Sci 265(1408): 1809-17

Phillips, M. L., A. W. Young, et al. (1997). “A specific neural substrate for perceiving facial expressions of disgust”. Nature 389(6650): 495-8

Pickett, E. R., E. Kuniholm, et al. (1998). “Selective speech motor, syntax and cognitive deficits associated with bilateral damage to the putamen and the head of the caudate nucleus: a case study”. Neuropsychologia 36(2): 173-88

Poldrack, R. A., V. Prabhakaran, et al. (1999). “Striatal activation during acquisition of a cognitive skill”. Neuropsychology 13(4): 564-74

Poldrack, R. A., A. D. Wagner, et al. (1999). “Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex”. Neuroimage 10(1): 15-35

Pöppel, E., R. Held, et al. (1973). “Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man”. Nature 243(405): 295-6

Popper, K. (1968). Logic of scientific discovery. Harper and Row, New York

Posner, M. (1973). Cognition: An introduction. Scott, Foresman and Company, Glenview, Illinois

Pulvermuller, F., R. Assadollahi, et al. (2001). “Neuromagnetic evidence for early semantic access in word recognition”. Eur J Neurosci 13(1): 201-5

Purcell, E. M., H. C. Torrey, et al. (1946). “Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid”. Physical Review 69(37)

Radanovic, M. and M. Scaff (2003). “Speech and language disturbances due to subcortical lesions”. Brain Lang 84(3): 337-52

Raichle, M. E. (2001). “Cognitive neuroscience. Bold insights”. Nature 412(6843): 128-30

Rauch, S. L., P. J. Whalen, et al. (1997). “Striatal recruitment during an implicit sequence learning task as measured by functional magnetic resonance imaging”. Hum Brain Mapp 5(2): 124-32

Raymer, A. M., P. Moberg, et al. (1997). “Lexical-semantic deficits in two patients with dominant thalamic infarction”. Neuropsychologia 35(2): 211-9

Reber, A. S. (1967). “Implicit learning of artificial grammars”. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior 6: 855-863

Reber, A. S. (1969). “Transfer of synthetic structure in synthetic languages”. Journal of Experimental Psychology 81: 115-119

Reber, A. S. (1993). Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious. Oxford University Press, Oxford

Regard, M. and T. Landis (1988). Beauty may differ in each half of the eye of the beholder. Beauty and the brain: Biological aspects of aesthetics. I. Rentschler, B. Herzberger and D. Epstein. Basel, Birkhäuser Verlag

Rentschler, I., Ed. (1988). Beauty and the Brain - biological aspects of aesthetics. Basel, Birkhäuser

Ritter, J. and K. Gründer, Eds. (1976). Historisches Wörterbuch der Philosophie. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft

Rizzolatti, G. and L. Fadiga (1998). “Grasping objects and grasping action meanings: the dual role of monkey rostroventral premotor cortex (area F5)”. Novartis Found Symp 218: 81-95; discussion 95-103

Rizzolatti, G., L. Fadiga, et al. (1999). “Resonance behaviors and mirror neurons”. Arch Ital Biol 137(2-3): 85-100

Rizzolatti, G., L. Fadiga, et al. (1996). “Premotor cortex and the recognition of motor actions”. Brain Res Cogn Brain Res 3(2): 131-41

Rolls, E. T. (2000). “The orbitofrontal cortex and reward”. Cereb Cortex 10(3): 284-94

Rosenthal, R., J. A. Hall, et al. (1979). Sensitivity to nonverbal communication: The PONS test. John Hopkins University Press, Baltimore

Rowe, A. D., P. R. Bullock, et al. (2001). “'Theory of mind' impairments and their relationship to executive functioning following frontal lobe excisions”. Brain 124(Pt 3): 600-616

Rumelhart, D. E. and J. L. McClelland (1986). Parallel distributed processing. MIT Press, Cambridge, M. A.

Rushworth, M. F., K. A. Hadland, et al. (2002). “Role of the human medial frontal cortex in task switching: a combined fMRI and TMS study”. J Neurophysiol 87(5): 2577-92

Russell, T. A., K. Rubia, et al. (2000). “Exploring the social brain in schizophrenia: left prefrontal underactivation during mental state attribution”. Am J Psychiatry 157(12): 2040-2

Sabbagh, M. A. and M. Taylor (2000). “Neural correlates of theory-of-mind reasoning: an event-related potential study”. Psychol Sci 11(1): 46-50

Sakai, K., J. B. Rowe, et al. (2002). “Parahippocampal reactivation signal at retrieval after interruption of rehearsal”. J Neurosci 22(15): 6315-20

Saltzman, J., E. Strauss, et al. (2000). “Theory of mind and executive functions in normal human aging and Parkinson's disease”. J Int Neuropsychol Soc 6(7): 781-8

Saver, J. L. and A. R. Damasio (1991). “Preserved access and processing of social knowledge in a patient with acquired sociopathy due to ventromedial frontal damage”. Neuropsychologia 29(12): 1241-9

Saykin, A. J., S. C. Johnson, et al. (1999). “Functional differentiation of medial temporal and frontal regions involved in processing novel and familiar words: an fMRI study”. Brain 122(Pt 10): 1963-71

Schacter, D. L. (1992). “Understanding implicit memory. A cognitive neuroscience approach”. Am Psychol 47(4): 559-69

Schatz, J., S. Hale, et al. (1998). “Cerebellar contribution to linguistic processing efficiency revealed by focal damage”. J Int Neuropsychol Soc 4(5): 491-501

Schendan, H. E., M. M. Searl, et al. (2003). “An FMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning”. Neuron 37(6): 1013-25

Schlaug, G., U. Knorr, et al. (1994). “Inter-subject variability of cerebral activations in acquiring a motor skill: a study with positron emission tomography”. Exp Brain Res 98(3): 523-34

Schlenker, B. R. and M. F. Weigold (1992). “Interpersonal processes involving impression regulation and management”. Annual Review of Psychology 43(133-168)

Schmahmann, J. D. and D. N. Pandya (1997). “The cerebrocerebellar system”. Int Rev Neurobiol 41: 31-60

Schopenhauer, A. (1998). Die Welt als Wille und Vorstellung. Deutscher Taschenbuchverlag, München

Schulkin, J. (2000). “Theory of mind and mirroring neurons”. Trends Cogn Sci 4(7): 252-254

Schultz, W. and R. Romo (1992). “Role of primate basal ganglia and frontal cortex in the internal generation of movements. I. Preparatory activity in the anterior striatum”. Exp Brain Res 91(3): 363-84

Schultz, W., R. Romo, et al. (1995). Reward-related signals carried by dopamine neurons. Models of information processing in the basal ganglia. J. C. Houk, J. L. Davis and D. G. Beiser. Cambridge, MA, MIT Press: 233-248

Scott, S. K., A. W. Young, et al. (1997). “Impaired auditory recognition of fear and anger following bilateral amygdala lesions”. Nature 385(6613): 254-7

Seltzer, B. and D. N. Pandya (1989). “Frontal lobe connections of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey”. J Comp Neurol 281(1): 97-113

Seltzer, B. and D. N. Pandya (1989). “Intrinsic connections and architectonics of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey”. J Comp Neurol 290(4): 451-71

Seltzer, B. and D. N. Pandya (1994). “Parietal, temporal, and occipital projections to cortex of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey: a retrograde tracer study”. J Comp Neurol 343(3): 445-63

Sergent, J. (1982). “The cerebral balance of power: confrontation or cooperation?”. J Exp Psychol Hum Percept Perform 8(2): 253-72

Shidara, M. and B. J. Richmond (2002). “Anterior cingulate: single neuronal signals related to degree of reward expectancy”. Science 296(5573): 1709-11

Simonton, D. K. (1980). “Intuition and analysis: A predictive and explanatory model”. Genetic Psychology Monographs 102: 3-40

Singh, S. (1997). Fermat`s Last Theorem. Fourth Estate, London

Speedie, L. J., N. Brake, et al. (1990). “Comprehension of prosody in Huntington's disease”. J Neurol Neurosurg Psychiatry 53(7): 607-10

Speedie, L. J., E. Wertman, et al. (1993). “Disruption of automatic speech following a right basal ganglia lesion”. Neurology 43(9): 1768-74

Sprengelmeyer, R., A. W. Young, et al. (1996). “Loss of disgust. Perception of faces and emotions in Huntington's disease”. Brain 119(Pt 5): 1647-65

St George, M., M. Kutas, et al. (1999). “Semantic integration in reading: engagement of the right hemisphere during discourse processing”. Brain 122(Pt 7): 1317-25

Stark, C. E. and L. R. Squire (2001). “Simple and associative recognition memory in the hippocampal region”. Learn Mem 8(4): 190-7

Steuernagel, B., Ed. (2001). Wege der Erkenntnis in der Medizin - Intuition, Erfahrung , Wissenschaft. Deutsche Hochschulschriften. Egelsbach bei Frankfurt am Main, Hänsel-Hohenhausen

Stone, V. E., S. Baron-Cohen, et al. (1998). “Frontal lobe contributions to theory of mind”. J Cogn Neurosci 10(5): 640-56

Strachan, A. L. (2000). “In the Brain of the Beholder”. The Harvard Brain 7

Svensen, M., F. Kruggel, et al. (2002). “ICA of fMRI group study data”. Neuroimage 16(3 Pt 1): 551-63

Takenouchi, K., H. Nishijo, et al. (1999). “Emotional and behavioral correlates of the anterior cingulate cortex during associative learning in rats”. Neuroscience 93(4): 1271-87

Talairach, J. and P. Tournoux (1988). Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain: 3-dimensional proportional system: an approach to cerebral imaging. Thieme, Stuttgart

Talairach, J. and P. Tournoux (1993). Referentially oriented cerebral MRI anatomy: an atlas of stereotaxic anatomical correlations for gray and white matter. Thieme, Stuttgart

Thiele-Dohrmann, K. (1990). Intuition: Göttlicher Funke oder unbewußter Datenspeicher? Kabel, Hamburg

Thompson-Schill, S. L., G. K. Aguirre, et al. (1999). “A neural basis for category and modality specificity of semantic knowledge”. Neuropsychologia 37(6): 671-6

Thompson-Schill, S. L., M. D'Esposito, et al. (1997). “Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: a reevaluation”. Proc Natl Acad Sci U S A 94(26): 14792-7

Tieszen, R. L. (1989). Mathematical Intuition. Kluwer, Dordrecht

Toga, A. W. and J. C. Mazziotta, Eds. (1996). Brain Mapping: The Methods. San Diego, Academic Press

Tranel, D. (1994). “Acquired sociopathy: the development of sociopathic behavior following focal brain damage”. Prog Exp Pers Psychopathol Res: 285-311

Tranel, D. and H. Damasio (1994). “Neuroanatomical correlates of electrodermal skin conductance responses”. Psychophysiology 31(5): 427-38

Tranel, D. and B. T. Hyman (1990). “Neuropsychological correlates of bilateral amygdala damage”. Arch Neurol 47(3): 349-55

Turkeltaub, P. E., G. F. Eden, et al. (2002). “Meta-analysis of the functional neuroanatomy of single-word reading: method and validation”. Neuroimage 16(3 Pt 1): 765-80

Tversky, A. and D. Kahneman (1981). “The framing of decisions and the psychology of choice”. Science 211(4481): 453-8

Tversky, A. and D. Kahneman (1983). “Extensional Versus Intuitive Reasoning: The Conjunction Fallacy in Probability Judgment”. Psychological Review 90(4): 440-451

Van Lancker, D. (1990). “The neurology of proverbs”. Behavioral Neurology 3: 169-187

van Veen, V. and C. S. Carter (2002). “The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies”. Physiol Behav 77(4-5): 477-82

Vandenberghe, R., C. Price, et al. (1996). “Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures”. Nature 383(6597): 254-6

Vanzetta, I. and A. Grinvald (1999). “Increased cortical oxidative metabolism due to sensory stimulation: implications for functional brain imaging”. Science 286(5444): 1555-8

Vertes, R. P., Z. Albo, et al. (2001). “Theta-rhythmically firing neurons in the anterior thalamus: implications for mnemonic functions of Papez's circuit”. Neuroscience 104(3): 619-25

Villringer, A. and U. Dirnagl (1995). “Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging”. Cerebrovasc Brain Metab Rev 7(3): 240-76

von Holst, E. and H. Mittelstaedt (1950). “Das Reafferenzprinzip”. Naturwissenschaften 37: 464-476

Wagner, A. D., W. Koutstaal, et al. (2000). “Task-specific repetition priming in left inferior prefrontal cortex”. Cereb Cortex 10(12): 1176-84

Walton, M. E., D. M. Bannerman, et al. (2002). “The role of rat medial frontal cortex in effort-based decision making”. J Neurosci 22(24): 996-1003

Wedell, R. A. (1994). “Effects of subcortical lesion site on human emotional behavior”. Brain and Cognition 25: 161-193

Wickens, J. R., R. Kotter, et al. (1995). “Effects of local connectivity on striatal function: stimulation and analysis of a model”. Synapse 20(4): 281-98

Winner, E. and H. Gardner (1977). “The comprehension of metaphor in brain-damaged patients”. Brain 100(4): 717-29

Wittgenstein, L. (1984). Philosophische Untersuchungen. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main

Young, A. W., J. P. Aggleton, et al. (1995). “Face processing impairments after amygdalotomy”. Brain 118(1): 15-24

Young, A. W., D. J. Hellawell, et al. (1996). “Facial expression processing after amygdalotomy”. Neuropsychologia 34(1): 31-9

Zavoisky, E. (1944). “Paramagnetic absorption of a solution in parallel fields”. J. Phys. USSR 8: 377-380

7 Anhang

Tab. I: Eigenschaften impliziter und rationaler Entscheidungen

Intuitive Entscheidungen	Rationale Entscheidungen
Gefühlskomponente	
Starke Gefühlskomponente (49)	Schwache Gefühlskomponente (10)
• Gefühl, Fühlen, gefühlsbetont, erspürt (28) • Emotion, emotional, affektiv (10) • Stimmung, Laune (5) • Instinkt, instinktiv (6)	• nicht stimmungsabhängig, unemotional (6) • besonnen, ruhig (3) • kaltblütig (1)
Verstandeskomponente	
Schwache Verstandeskomponente (18)	Starke Verstandeskomponente (83)
• undurchdacht, ohne Nachdenken (2) • unvernünftig, unlogisch, irrational (3) • unüberlegt (13)	• Verstand (1) • Vernunft, vernünftig (8) • Denken, Nachdenken, durchdacht (7) • Überlegen, überlegt (11) • argumentativ (2) • logisch (Ursache – Wirkung) (16) • Abwägen (von Vor- und Nachteilen, Kosten und Nutzen) (18) • Prioritäten setzen (1) • Intelligenz, intelligent (5) • Analyse (1), Reflexion (2), Abstraktion (1) • Fakten (3), sachlich (4) • Konzept (1), Schema (1) • wissenschaftlich (1)

Körperlichkeit	
„Bauch“ (20)	„Kopf“ (8)
• Körper (1) • „aus dem Bauch heraus" (14) • Herz (4) • „6. Sinn" (1)	• Kopf, „verkopft" (7) • Gehirn (1)
Explizitheit	
implizit (14)	explizit (47)
• nicht nachvollziehbar, nicht begründbar (5) • „ohne Abwägen" (1) • ohne Argument (1) • ohne "Hintergrundwissen" (1) • Schätzung (2) • unbewusst, „unterbewusst" (4)	• nachvollziehbar (2), begründbar (1) • Abwägen (18) • logisch (16) • Fakten (3), Konzept / Schema (2), sachlich (1) • berücksichtigt: Entscheidungshilfen (1), andere Meinungen, Beratung (2) • „bewusst" (1)
Ich-Haftigkeit	
"Selbstbestimmt" (13)	"Fremdbestimmt" (17)
• subjektiv (2) • selbstbezogen (2) • individuell (1) • eigenverantwortlich (3) • „Wie geht es mir damit ?" (1) • „Wie hätte ich es gerne ?"(1) • persönliche Neigung (1) • Wunsch (1) • persönliche Erfahrung (1)	• objektiv (1) • beruht auf Bildung und Wissen (3) • beeinflusst von: Gewissen (1), Gesellschaft (1), Erziehung (1), sozialem Druck („von außen getroffen"), Gruppenzwang (2) • brav, gehorsam (1) • situationsbedingt (1) • „in Kommunikation mit anderen" (1) • „berücksichtigt die Situation anderer" (1) • persönliche Erfahrung (3)

Spontaneität	
parallel (47)	sequentiell (50)
• spontan (30) • reflexartig (1) • augenblicklich (1) • impulsiv (2)	• vorausplanend, vorausschauend, vorausdenken, berechnend (5) • auf die Zukunft gerichtet (3) • langfristig, weitsichtig (2) • zielgerichtet (1) • Folgen und Konsequenzen bedenkend (4) • Abwägen von Vor- und Nachteilen, Kosten und Nutzen (18)
• „kommt einfach" → passiv (1) • „drängt sich auf" (1) • Eingebung (1)	• pragmatisch (2) • „wird gemacht" (Kopf) → aktiv (1)
• wechselhaft (2) • sprunghaft (1)	
• schnell (7)	• langwierig, lange (11), schwierig (1)
Geschlechtlichkeit	
• weiblich (8)	• männlich (5)
Persönlichkeitseigenschaften	
• Kreativität (1) • Phantasie (1) • Gewitztheit (1) • lebhaft, sanguinisch (1) • Risikobereitschaft (1) • Weisheit (1) • Glaube (1) • Sympathie (1) • Hilfsbereitschaft (1)	• Intelligenz (5) • Habgier (1) • Geiz (1)

Lebensbereiche	
• Freundschaft (4) • Beziehung (1) • Ausgehen (1) • Partnerwahl (1) • Liebe (1)	• Uni, Studium (2), Beruf, Arbeit (3) • Geld, Finanzen (4) • Verträge (1) • Wichtige Entscheidungen (1) • Pflichten (1)
• Essen, Hunger (3) • Sport (1)	• Lernen (2) • Prüfungen (1)
• Hilfeleistung (1) • Kinderschutz (1)	• Einkaufen (1) • Urlaub fahren (1) • Kinderwunsch (1) • Familienplanung (1) • Gesundheitliche Vorsorge (1) • Sorge um Angehörige (1)

Tab. I: Ergebnisse einer standardisierten Befragung von 52 Studenten der vorklinischen Semester mit der Frage **„Welche Eigenschaften kennzeichen intuitive und rationale Entscheidungen?“**. In einer freien Textanalyse nach Mayring wurden zunächst alle relevanten Begriffe extrahiert und systematisch geordnet (Mayring 2000). Die Analyse der semantischen Beziehung zwischen den genannten Begriffen erfolgte nach verschiedenen Gesichtspunkten, nach der Ähnlichkeit der untersuchten Begriffe (Prototypensemantik) und der Struktur ihrer gegenseitigen Beziehung im Sinne der Wortfeldtheorie (Strukturelle Semantik). Während die Prototypensemantik versucht, prototypische und marginale Bedeutungen von Begriffen zu differenzieren und nach Familienähnlichkeiten zu ordnen, wird in der Strukturellen Semantik primär die Bedeutung eines Begriffs in Beziehung zu anderen Begriffen desselben Wortfeldes untersucht. In der Wortfeldtheorie werden verschiedene Beziehungsebenen unterschieden. Zum einen die sog. Koordination, die für Wörter steht, die auf der gleichen semantischen Ebene stehen, jedoch gegenteilige Paare bilden (z.B. Hund – Katze) mit denen sie ein gemeinsames Wortfeld aufspannen, das sich unter einem übergeordneten Begriff (Hyperonym) subsumieren lässt (z.B. Haustiere). Unter Kollokationen versteht man typische Wortverbindungen, in der Regel aus Substantiven, Adjektiven und Verben, die den typischen Verwendungskontext exemplifizieren und damit

die Bedeutung des entsprechenden Begriffs aufzeigen. Überordnungen (Hyperonyme), auch Oberbegriffe, Sammelbegriffe oder Oberkategorien genannt, stehen in einer hierarchischen Beziehung zu ihnen untergeordneten Begriffen (Hyponyme). Dahingegen drückt Synonymie die Bedeutungsgleichheit von Wörtern aus.

Tab. II: Worttriaden

coherent 1	**coherent 2**	**coherent 3**	**coherent 4**
Ziege, hoch, grün } Berg	Salz, tief, Gischt } Meer	Tönung, Haar, Öl } Frisör	Pappe, Quadrat, offen } Schachtel
coherent 5	**coherent 6**	**coherent 7**	**coherent 8**
leer, weiß, Linien } Blatt Papier	Schein, Laden, Händler } Pfand	Groß, Blatt, Schatten } Baum	Kirche, Licht, Geburtstag } Kerze, Weihnachten
coherent 9	**coherent 10**	**coherent 11**	**coherent 11**
Magie, Plüsch, Fußboden } Teppich	Kaninchen, Wolke, Sahne } weiß	Rohr, Holz, heiß } Herd, Ofen	zerbrochen, klar, Auge } Glas
coherent 13	**coherent 14**	**coherent 15**	**coherent 16**
Faß, Garten, Bauch } Bier	rein, Blau, Fall } Wasser	Stein, Tür, Strasse } Haus	Riemen, Tasche, Zeit } Uhr
coherent 17	**coherent 18**	**coherent 19**	**coherent 20**
Pass, Flug, werfen } oben, Spiel	Felsen, Ware, Stahl } hart	Geld, Stuhl, Kellner } Bar	Sandwich, Golf, Herren } Club
coherent 21	**coherent 22**	**coherent 23**	**coherent 24**
Treffer, Gleichstand, Tennis } Spiel	Stoff, elend, Kartoffel } Sack	Tinte, Kreuz, rot } Herz	tief, Stein, Wasser } Brunnen
coherent 25	**coherent 26**	**coherent 27**	**coherent 28**
Zirone, Sand, Mond } gelb	Ruhe, Holz, Park } Bank	Anzug, Pause, Oper } Karten	Heizung, Eis, Winter } kalt

coherent 29

Herz
Feuer
Ampel
} rot

coherent 30

Locher
Tesa
Lampe
} Schreibtisch

coherent 31

Spiegel
Radio
Reifen
} Auto

coherent 32

Seide
rutschig
eben
} glatt

coherent 33

Sonne
Honig
Butter
} gelb

coherent 34

Lärm
Qualm
heiß
} Feuer

coherent 35

groß
Haar
Schotte
} Highlander

coherent 36

trödeln
zäh
Sirup
} langsam

coherent 37

Kissen
Leder
Wohnzimmer
} Sofa

coherent 38

Wasser
Tropen
Dampf
} feucht

coherent 39

Salat
Topf
Gabel
} Essen

coherent 40

Computer
Rennen
Rakete
} schnell

coherent 41

Himmel
Wasser
Tinte
} blau

coherent 42

Baum
Möbel
Feuer
} Holz

coherent 43

Deckel
Lesen
Papier
} Buch

coherent 44

Glas
Strom
hell
} Glühbirne

coherent 45

Teppich
Holz
Stein
} Fußboden

coherent 46

Energie
Sturm
Segel
} Wind

coherent 47

Impfung
Geld
Pass
} Reisen

coherent 48

Gemüse
Brot
Morgen
} Markt

coherent 49

Schuhe
Shirt
schnell
} Laufen

coherent 50

ruhig
Saiten
Musik
} Geige
Chello

incoherent 1	**incoherent 2**	**incoherent 3**	**incoherent 4**	**incoherent 5**
Vogel	Licht	Stadt	Mädchen	Haus
Rohr	Volk	Wurzel	sozial	Löwe
Strasse	Kopf	Auto	Korn	Butter

incoherent 6	**incoherent 7**	**incoherent 8**	**incoherent 9**	**incoherent 10**
Finger	anhalten	Kekse	Bonbons	rauh
sprechen	Tür	leer	Giebel	eben
Wurm	Sahne	Zügel	Stadt	Münze

incoherent 11	**incoherent 12**	**incoherent 13**	**incoherent 14**	**incoherent 15**
Magie	Ware	trocken	Seide	schlau
bellen	Kehle	Laden	Stein	heiß
Kredit	gehen	Tennis	Ziege	strecken

incoherent 16	**incoherent 17**	**incoherent 18**	**incoherent 19**	**incoherent 20**
Messer	Gürtel	Berg	Wolke	Trompete
Fuß	Handel	Schere	Blatt	Badewanne
Schachtel	Nase	weiß	Pfand	Kredit

incoherent 21	**incoherent 22**	**incoherent 23**	**incoherent 24**	**incoherent 25**
Vogel	Decke	Hammer	Bewegung	Hals
Hering	Schemel	Faden	blau	sehen
Dampf	Tasche	spielen	Tasche	Träne

incoherent 26	**incoherent 27**	**incoherent 28**	**incoherent 29**	**incoherent 30**
Schwan	klar	schwer	Gold	langweilig
Armee	rollen	Farben	Cracker	rund
Maske	Macht	Stoß	Rad	Schere

control 1	control 2	control 3	control 4	control 5
Nidevo	Salowus	Tumaya	Dikubin	Ratal
bifal	pokum	cazarim	jukal	Caguril
Dunud	Kugap	Vezal	Zugat	Liforu

control 6	control 7	control 8	control 9	control 10
Wamac	likemon	Lebac	Pulok	Gilanib
Penfon	Zemor	Wanib	Tugorel	Barob
teku	Tawop	berel	panib	Kanew

control 11	control 12	control 13	control 14	control 15
moval	Xedoha	Wunecil	Wucil	nemun
Valih	Dufor	Nodo	Pamun	Tepok
Pemav	Zenuh	jamun	Otowan	Gimon

control 16	control 17	control 18	control 19	control 20
Xeman	Tenag	Kudag	Silutag	Nopax
pomen	zalud	Kironu	waruf	linoder
Wupok	Morovek	tevek	Yoduv	Silok

control 21	control 22	control 23	control 24	control 25
Yoder	Winud	Wubid	Macade	Wubaxi
Woxol	Velok	Pabidu	Peko	Gepe
bielok	Zuw	jamul	Xedum	Katiko

control 26	control 27	control 28	control 29	control 30
Buwera	Xitapu	Nuro	Fefani	Xuko
Xetu	ovuno	Rabihal	Videnez	Tekeru
Pekemo	Nefo	Lumep	Misep	Lezem

control 31	control 32	control 33	control 34	control 35
Kupuro	Zetono	Cogade	Peral	Gamol
Nauhal	Kupor	Yeriton	samag	Wepan
Vukaben	Anezip	Vulu	Bolepiro	Nedasu

control 36	control 37	control 38	control 39	control 40
Mupeko	Jevez	Zutan	Gepil	Turaw
Linuh	Boma	Cemun	Xep	sewil
Zepera	fuwal	Lugote	arunam	Wodo

Tab III: Lokale Maxima der Beurteilung und des Erkennens semantischer Kohärenz (MB)

Anatomische Lokalisation (Brodman Areal)	links/rechts	Talairach Koordinaten (mm)			Z-Werte
		x	y	z	
(cohim+cohex+incoh) > baseline (a)					
Cerebellum (Lobus posterior)	r	6	-78	-16	5.59*
	r	42	-68	-42	3.72
	l	-42	-62	-20	4.48
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l>r	0	8	56	5.36*
Gyrus frontalis inferior (BA 9 / BA 47)	l	-52	10	24	5.07*
	r	54	18	-6	4.51
Thalamus	l	-2	-14	10	5.06*
Gyrus temporalis medius (BA 22/37)	l	-52	-44	-6	4.63
Lobus parietalis superior (Präcuneus, BA 7)	l	-28	-70	54	4.33
Lobus occipitalis (Cuneus, BA 17)	l	-14	-82	8	3.83
Gyrus frontalis medius (BA 9)	r	50	12	30	3.78
(cohim+cohex) > incoh (b)					
Cerebellum (Lobus posterior)	r	44	-72	-26	4.97
	r	18	-82	-20	4.20
	l	-20	-76	-20	3.91
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l>r	-6	10	58	4.60
	l	-20	6	66	3.65
Gyrus temporalis superior(BA 22)	r	56	10	-6	4.56
Colliculus superior	l>r	-4	-40	4	4.36
Gyrus frontalis inferior (BA 47)	l	-50	20	-10	4.03
Lobus parietalis superior (Präcuneus, BA 7)	l>r	-2	-68	58	4.02
Gyrus lingualis (BA 18)	l/r	0	-72	-4	3.91
Gyrus frontalis medius (BA 10)	l	-34	60	12	3.74
cohim > incoh (c)					
Gyrus temporalis superior (BA 22)	r	56	10	-8	4.69
Lobus parietalis superior (Präcuneus, BA 7)	l	-2	-70	58	4.08
Gyrus frontalis superior (prä-SMA, BA 6)	l>r	-6	4	64	4.00
Gyrus frontalus inferior (BA 47)	l	-52	16	-4	3.68
Cerebellum (Lobus posterior)	r	42	-66	-24	3.59
Lobus occipitalis (Gyrus lingualis, BA 18)	l	-4	-84	-16	3.58

Z-Werte auf Voxel-Ebene, p <.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel; * p korrigiert <.05

Tab. IV: Lokale Maxima impliziter und expliziter Urteile semantischer Kohärenz

Anatomische Lokalisation (Brodmann Areal)	links/rechts	Talairach Koordinaten (mm)			Z-Werte
		x	y	z	
cohim > cohex (SO)					
Lobus parietalis superior(Gyrus postcentralis,BA 2)	l	-34	-38	68	3.88
Lobus parietalis inferior (BA 40)	l	-54	-52	42	3.74
Sulcus temporalis superior (BA 22)	r	50	-36	4	3.49
Lobus occipitalis (Gyrus lingualis BA 18)	r	14	-52	2	3.58
cohim > cohex (R)					
Lobus parietalis inferior (BA 40)	r	58	-40	24	4,30
	l	-52	-56	40	4,07
Sulcus temporalis superior (BA 21/22)	r	46	-28	-10	4,10
Gyrus parahippocampalis (BA 27)	l	-24	-34	2	3,92
cohex > cohim (SO)					
Gyrus parahippocampalis (BA 35)	r	20	-22	-12	4.19
Gyrus frontalis medius(BA 6)	l	-28	4	60	4.15
cohex > cohim (R)					
Gyrus occipitalis medius (BA 19)	l	-34	-86	20	4,70
Gyrus parahippocampalis (BA 35)	r	22	-20	-10	4,25
Nucleus caudatus / Putamen	r	18	-16	20	4,01
	r	18	4	10	3,82
Gyrus cinguli anterior (BA 32)	l	-10	40	-12	3,74
Gyrus cinguli posterior (BA 23)	l	-4	-54	14	3,74
Colliculus superior	l/r	6	-28	-2	3,63
Thalamus (Nucleus anterior)	l	-4	-2	12	3,62
Gyrus frontalis inferior (BA 46)	l	-48	40	14	3,59
Gyrus temporalis medius (BA 39)	l	-46	-74	24	3,46

Z-Werte auf Voxel-Ebene, p <.001 unkorrigiert, minimale Aktivierung = 15 voxel

Lebenslauf **Rüdiger Ilg**

geboren am 6. September 1973
in München

Schulausbildung

Grundschule Glashütten Grundschule Meyernberg	1980 – 1984
Graf-Münster-Gymnasium Bayreuth	1984 – 1993

Medizinstudium

Universität des Saarlandes Homburg	1993 – 1996
Freie Universität Berlin	1996 – 1997
Ludwig-Maximilians-Universität München	1997 – 2000

Praktisches Jahr

LMU München und University of Toronto	1999 / 2000

Wissenschaftliche Tätigkeit

Stipendium des bayerischen Staates zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchs	2001 – 2003

Promotion zum Thema „Neurale Mechanismen impliziter Urteilsprozesse"
am Institut für Medizinische Psychologie bei Prof. Dr. Ernst Pöppel und
in der Arbeitsgruppe kognitive Neurologie und funktionelle Bildgebung bei
Prof. Dr. Gereon Fink am Institut für Medizin des Forschungszentrum Jülich

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Ernst Pöppel für die Anregung zur vorliegenden Fragestellung und den unermüdlichen Ansporn, sich mit den wirklichen Fragen auseinanderzusetzen. Zudem möchte ich mich ganz herzlich bei PD. Dr. Dr. Kai Vogeley und Prof. Dr. Gereon Fink vom Forschungszentrum Jülich bedanken, für die Unterstützung der ungewöhnlichen Idee und die Geduld bei der Umsetzung des Experiments.