

Funktionelle MRT

Stefan Pollmann · Tömme Noesselt

Funktionelle MRT

Grundlagen, Experimentaldesign und
Datenanalyse

 Springer

Stefan Pollmann
Institut für Psychologie
Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät
Naturwissenschaften
Magdeburg, Sachsen-Anhalt, Deutschland

Tömme Noesselt
Institut für Psychologie
Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät
Naturwissenschaften
Magdeburg, Sachsen-Anhalt, Deutschland

ISBN 978-3-662-68024-7 ISBN 978-3-662-68025-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68025-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Daniel Quinones

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Die funktionelle Magnetresonanztomographie ist eines der populärsten Verfahren für die Hirnbildgebung am Menschen. In diesem Lehrbuch geben wir eine Einführung in die methodischen Aspekte, die man für die Konzeption, Durchführung, Auswertung und Interpretation eines fMRT-Experiments benötigt. Das Buch eignet sich sowohl als Lehrbuch für fortgeschrittene Studenten, wie auch zum Selbststudium für Forscher, die eine eigene fMRT-Studie durchführen möchten.

Das Buch beginnt mit den physikalischen und physiologischen Grundlagen, die für das Verständnis der fMRT vonnöten sind. Weiterhin werden grundlegende Aspekte der experimentellen Designplanung thematisiert. Neben der univariaten Datenanalyse und Konnektivitätsanalysen wird auch die zunehmend an Bedeutung gewinnende multivariate Musteranalyse vorgestellt. Weitere Kapitel behandeln die Darstellung und Interpretation der Bilddaten, die bei der fMRT entstehen. Schließlich werden auch Grundzüge der fMRT bei Patienten vorgestellt.

Das Buch ist im Rahmen einer Lehrveranstaltung für Masterstudenten der Psychologie entstanden. Wir danken den Studenten für ihre Rückmeldungen, die zur Verbesserung des Buches beigetragen haben. Unser besonderer Dank gilt unseren Kollegen und Mitarbeitern; Dr. Claus Tempelmann von der Klinik für Neurologie der Universität Magdeburg, für Rat und die Verfügungstellung von Bildmaterial, sowie Dr. Radha Meghanathan, M.Sc. Nico Marek, Dr. Peter Vavra und B.Sc Judith

VI Vorwort

Bomba, die uns bei der Erstellung des Buches unterstützt haben. Nicht zuletzt möchten wir uns auch bei den Mitarbeitern des Springer Verlags, insbesondere Frau Christiane Beisel und Herrn Daniel Quinones, für ihre Unterstützung bedanken.

Magdeburg
Juli 2023

Stefan Pollmann
Tömme Noesselt

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Magnetresonanztomographie	1
1.1	Woher kommt das (f)MRT-Signal?	2
1.1.1	Physikalische Grundlagen	2
1.1.2	Magnetresonanz	4
1.1.3	Messung des MR-Signals	5
1.1.4	Gewebespezifische Signaländerungen und Bildparameter	7
1.2	Vom Signal zum Bild – Bildrekonstruktion	8
1.2.1	Schichtselektion	8
1.2.2	Selektion von Bereichen in der Messschicht durch Frequenz- und Phasenkodierung	9
1.2.3	Messequenztypen und Bildkontrast	11
1.2.4	Artefakte	13
1.3	Aufbau des MR-Geräts	15
1.4	MR-Sicherheit	17
1.4.1	B_0 -Feld	17
1.4.2	Gradienten	18
1.4.3	Hochfrequenz-Pulse	19
1.4.4	Sicherheitsmaßnahmen	19
	Literatur	21
2	Der BOLD-Effekt	23
2.1	Physikalische Mechanismen des BOLD-Effekts	24
2.2	Zeitliche Dynamik des BOLD-Effekts	24
2.3	Physiologische Mechanismen des BOLD-Effekts	25

VIII Inhaltsverzeichnis

2.4	Räumliche Spezifität des BOLD-Effekts	27
2.5	BOLD-Effekt und neuronales Antwortverhalten	29
	Literatur	30
3	Datenvorverarbeitung	33
3.1	Qualitätskontrolle	34
3.2	Korrektur der zeitlichen Reihenfolge der Schichtakquisition	35
3.3	Bewegungskorrektur	36
3.4	Koregistrierung individueller Datensätze	40
3.5	Räumliche Normalisierung	41
	3.5.1 MNI-Koordinatensystem	44
	3.5.2 Oberflächenbasierte Normalisierung	44
	3.5.3 Funktionelle Normalisierung	45
3.6	Räumliche Glättung	46
3.7	Vorverarbeitungspakete und Standardisierungsversuche	46
	Literatur	47
4	Univariate Verfahren zur Auswertung von fMRT-Daten	49
4.1	Allgemeines Lineares Modell	60
4.2	Statistische Inferenz	62
4.3	Korrekturmethode für multiple Vergleiche	65
4.4	Reduktion der Voxelanzahl – ROI-Analysen	67
4.5	Parametrische Designs	68
4.6	Bewertung der eigenen Ergebnisse	70
	Literatur	70
5	Experimentelle Designs für fMRT	73
5.1	Block- vs. ereigniskorreliertes Design	74
5.2	Linearität überlagerter Signale	75
5.3	Designoptimierung	76
	5.3.1 Dauer der Messung	80
	5.3.2 Analyse des BOLD-Signalverlaufs	80
	5.3.3 Kontraste zwischen verschiedenen Experimentalbedingungen	81
	5.3.4 Jittering und Oversampling	83
	Literatur	84
6	Strukturelle und funktionelle Konnektivität	85
6.1	Messung von strukturellen Unterschieden	85
6.2	Messung von struktureller Konnektivität	86

6.3	Messung von interregionaler funktioneller Konnektivität	87
	Literatur	91
7	Multivariate Musteranalyse	93
7.1	Unterschiede zur univariaten Analyse	93
7.2	Multivariate Klassifikation von fMRT-Daten	95
7.3	Repräsentationale Ähnlichkeitsanalyse	103
	Literatur	109
8	Visualisierung und Interpretation der Hirnaktivierung	113
8.1	Neuroanatomie	114
	8.1.1 Atlanten	114
8.2	Verschiedene Darstellungsweisen der funktionellen Neuroanatomie	115
	8.2.1 Makroskopische Anatomie	115
	8.2.2 Cytoarchitektur und Faserverbindungen	117
8.3	Bildgebungsdaten erscheinen realer als abstrakte Daten	119
8.4	Das Problem der reversen Inferenz	120
	Literatur	122
9	Zeitliche und räumliche Auflösung des BOLD-Signals	123
9.1	Zeitliche Auflösung des BOLD-Signals	124
	9.1.1 Variation des BOLD-Signals	124
	9.1.2 Messung des BOLD-Zeitverlaufs	126
	9.1.3 Maximale zeitliche Auflösung des BOLD-Signals	128
9.2	Gemeinsame Messung von fMRT- und EEG-Signalen	130
9.3	Initialer Signalabfall	130
9.4	Räumliche Auflösung	131
	9.4.1 Abbildung der kolumnären Cortexarchitektur	131
	9.4.2 Schicht-spezifisches fMRT	131
	9.4.3 Räumliche Auflösung bei der multivariaten Musteranalyse	134
	9.4.4 Funktionelle Registrierung	135
	Literatur	138
10	Patienten-MR	141
10.1	Besondere Aspekte der fMRT-Untersuchung von Patienten	142
	10.1.1 Aktivierungslokalisation	142
	10.1.2 Einfluss von pathologischen Veränderungen auf das BOLD-Signal	143

X Inhaltsverzeichnis

10.1.3	Vasoaktive Substanzen	144
10.2	Präoperative fMRT	145
10.2.1	Epilepsiechirurgie	146
10.3	Diffusions-Traktographie	148
10.4	Läsions-Symptom Kartierung	149
10.4.1	ROI-basierte Methoden	149
10.4.2	Voxel-basierte Methoden	150
10.4.3	Bedeutung der Kontrollgruppe	150
10.4.4	Multiple Läsionen	151
	Literatur	152
	Stichwortverzeichnis	153