



K.-M. Haus · C. Held · A. Kowalski · A. Krombholz
M. Nowak · E. Schneider · G. Strauß · M. Wiedemann

Praxisbuch Biofeedback und Neurofeedback

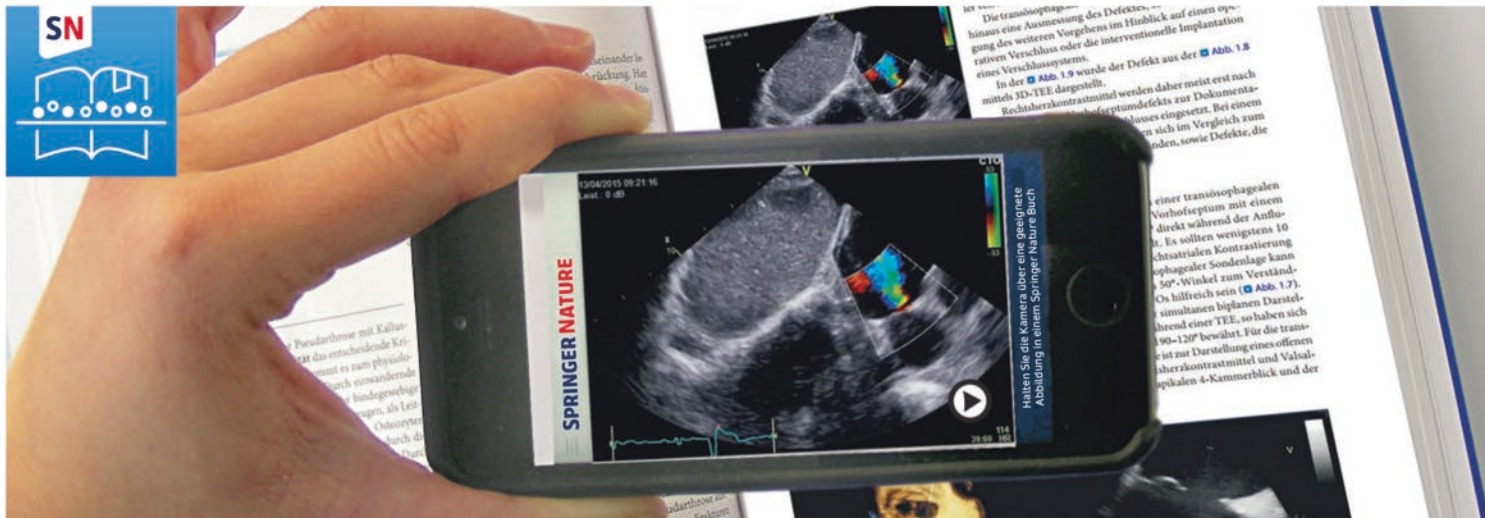
3. Auflage

MOREMEDIA



 Springer

Praxisbuch Biofeedback und Neurofeedback



Springer Nature More Media App

Videos und mehr mit einem „Klick“
kostenlos aufs Smartphone und
Tablet



Kostenlos
downloaden

- Dieses Buch enthält zusätzliches Onlinematerial, auf welches Sie mit der Springer Nature More Media App zugreifen können.*
- Achten Sie dafür im Buch auf Abbildungen, die mit dem Play Button  markiert sind.
- Springer Nature More Media App aus einem der App Stores (Apple oder Google) laden und öffnen.
- Mit dem Smartphone die Abbildungen mit dem Play Button  scannen und los gehts.

*Bei den über die App angebotenen Zusatzmaterialien handelt es sich um digitales Anschauungsmaterial und sonstige Informationen, die die Inhalte dieses Buches ergänzen. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Buches waren sämtliche Zusatzmaterialien über die App abrufbar. Da die Zusatzmaterialien jedoch nicht ausschließlich über verlagseigene Server bereitgestellt werden, sondern zum Teil auch Verweise auf von Dritten bereitgestellte Inhalte aufgenommen wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Zusatzmaterialien zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr oder nicht mehr in der ursprünglichen Form abrufbar sind.

Karl-Michael Haus
Carla Held
Axel Kowalski
Andreas Krombholz
Manfred Nowak
Edith Schneider
Gert Strauß
Meike Wiedemann

Praxisbuch Biofeedback und Neurofeedback

3. Auflage

Karl-Michael Haus
Praxis für Ergotherapie
Landau, Deutschland

Axel Kowalski
NeuroFit GmbH Therapie- und Trainings-Akademie
Krefeld, Deutschland

Manfred Nowak
Landau, Deutschland

Gert Strauß
Heidelberg, Deutschland

Carla Held
Lustadt, Deutschland

Andreas Krombholz
NeuroFit GmbH Therapie- und Trainings-Akademie
Krefeld, Deutschland

Edith Schneider
Praxis für Neurofeedback, Biofeedback und
Ergotherapie
Stuttgart, Deutschland

Meike Wiedemann
Praxis für Neurofeedback und Hypnose
Stuttgart, Deutschland

Die Online-Version des Buches enthält digitales Zusatzmaterial, das durch ein Play-Symbol gekennzeichnet ist. Die Dateien können von Lesern des gedruckten Buches mittels der kostenlosen Springer Nature „More Media“ App angesehen werden. Die App ist in den relevanten App-Stores erhältlich und ermöglicht es, das entsprechend gekennzeichnete Zusatzmaterial mit einem mobilen Endgerät zu öffnen.

ISBN 978-3-662-59719-4 ISBN 978-3-662-59720-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59720-0>

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

Springer

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2013, 2016, 2020

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.

Fotonachweis Umschlag: © decade3d - fotolia.com
Umschlaggestaltung: deblik Berlin

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

Vorwort

Der Erfolg der ersten beiden Ausgaben des Praxisbuchs ist eine Reflektion des stetig steigenden Interesses an Biofeedback und Neurofeedback bei Fachleuten und Betroffenen. Dies spiegelt sich zum einen in der steigenden Anzahl der ausgebildeten Therapeuten, die Bio- und oder Neurofeedback in ihren Praxen anbieten, und zum anderen in den stetig zunehmenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Recherchen in der bekannten Datenbank Pubmed mit dem Stichwort Neurofeedback ergeben pro Jahr ca. 180 Neuveröffentlichungen.

Nach wie vor erzeugen psychische Erkrankungen und chronische Schmerzen die größten sozialmedizinischen und ökonomischen Probleme im Gesundheitswesen. So leidet z. B. ein Drittel der arbeitenden Bevölkerung an einer psychischen Erkrankung. Nicht nur sie werden unzureichend versorgt, sondern auch 50 % der Schmerzpatienten erfahren im klinischen Routinebetrieb keine adäquate Schmerzlinderung. Das und die weiterhin desolaten psychotherapeutische und psychiatrische Versorgung der Bevölkerung schreien förmlich nach einer Abkehr von der seither praktizierten „Reparaturmedizin“.

Zweifellos war das Präventionsgesetz, nachdem Kassen und Unternehmen zukünftig mehr für die Prävention ausgeben sollen, eine richtige Entscheidung. Es hat bereits in großen Unternehmen dazu geführt, dass die betriebliche Gesundheitsfürsorge auch Bio- und Neurofeedback mit einschließt. Teilweise wird dies sogar zusätzlich wissenschaftlich begleitet. Der Perspektivenwandel, weg von der Wirkungsweise der Medikamente, die immer mehr enttäuschen, hin zum besseren Verständnis der Selbstorganisationsvorgänge im Gehirn, kommt immer mehr ins Rollen.

Biofeedback und Neurofeedback tragen nebenwirkungsfrei zur Gesundheit und zur Selbstregulation bei. Das ist ein wichtiger Aspekt für Menschen, die das Bedürfnis haben, selbst Verantwortung für ihre Gesundheit und ihre Lebensqualität zu übernehmen. Anstatt passiv behandelt zu werden, lernen sie selbst zu handeln.

Seit Erscheinen der ersten Auflage 2012 hat sich viel in der Grundlagenforschung über die ver-

schiedenen Netzwerke des Gehirns getan. Sie liefert neue Erklärungsmodelle, weshalb gerade das Feedback der langsamen kortikalen Potenziale einen so durchschlagenden Erfolg bei einer breiten Palette von psychischen Störungen hat. Die Erklärung der Wirkmechanismen für Neurofeedback schien sich in den letzten Jahren v. a. in der Anwendung bei Epilepsie und AHDS eher in linearen Erklärungsmodellen zu erschöpfen. Im Gegensatz dazu liefern die jüngsten Forschungen im Bereich der dynamischen Netzwerke neue Ansichten, welche der Natur des Gehirns als komplexes System mit der Fähigkeit zur Selbstregulation näherkommen.

Wir bedanken uns bei unseren Patienten, die uns immer wieder gezeigt haben, dass sie zum Teil unüberwindbar scheinende Hindernisse bezwungen haben. Ihr Einsatz und ihre Motivation sind bewundernswert und spornen auch uns immer wieder an, unser Bestes zu geben. Wir wünschen uns, dass sich Bio- und Neurofeedback weiter verbreiten, und dass dadurch immer mehr Menschen die Möglichkeit haben, ihr Potenzial zu verwirklichen.

Allerdings bringt eine zunehmende Beliebtheit von Selbstoptimierung durch „Neuroenhancement“ eine Vielfalt neuer Entwicklungen mit sich, die auch vor dem Spielbereich nicht Halt macht. Im Gegenteil, der Markt wird überschwemmt mit Gadgets, die „Instant-Nirwana“ oder wundersame Leistungssteigerungen zusichern, oft genug nicht halten, was sie versprechen, und zuweilen Schaden anrichten. Einige Biofeedback-Apps leisten einen sinnvollen Beitrag zur Selbstregulation, da sie vor allem periphere, leicht wahrnehmbare und messbare Biosignale erfassen. Ganz anders sieht das bei den Heimanwendungen für Neurofeedback aus. Bei allem Verständnis für die „Do-it-yourself“-Bewegung: „Therapie am Küchentisch“ ist bei nicht gesunden, instabilen Gehirnen bedenklich.

Gut ausgebildete Therapeuten sind durch Apps nicht zu ersetzen, denn es ist der menschliche, gefühlvolle und achtsame Dialog, der den Heilungsvorgang prozessorientiert und zielführend unterstützt. Dieses Buch will zu solch einem respektvollen und verantwortungsbewussten Einsatz der Methode beitragen.

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen, Methoden und Durchführung von Biofeedback und Neurofeedback

1	Biofeedback und Neurofeedback	3
1.1	Was ist Biofeedback?	4
1.1.1	Feedback	4
1.2	Was ist Neurofeedback?	6
1.2.1	Aufgaben des Gehirns	6
1.2.2	Bau und Organisation des Gehirns	6
1.2.3	Aus was besteht das Gehirn?	10
1.2.4	Die Entdeckung des Elektroenzephalogramms	16
1.2.5	Was wird mit dem EEG gemessen?	16
1.3	Lerntheoretische Grundlagen	19
1.3.1	Operantes Konditionieren	19
1.3.2	Transfer in den Alltag: Klassisches Konditionieren	19
1.4	Können alle Hirnstrukturen über Neurofeedback beeinflusst werden?	20
	Weiterführende Literatur	21
2	Peripheres Biofeedback	23
2.1	Was ist peripheres Biofeedback?	25
2.2	Die Rolle des vegetativen Nervensystems	25
2.3	Elektrodermale Aktivität (EDA)	26
2.3.1	Wie funktioniert das EDA-Feedback?	26
2.3.2	Anwendungsgebiete des EDA-Feedbacks	27
2.4	Temperaturfeedback	27
2.4.1	Wie funktioniert das Temperaturfeedback?	27
2.4.2	Anwendungsgebiete des Temperaturfeedbacks	28
2.5	Herzratenvariabilität (HRV)	28
2.5.1	Was ist die HRV?	28
2.5.2	Kohärenz von Atmung und Herzrate	28
2.5.3	Trainingsziele	29
2.5.4	Anwendungsgebiete des HRV-Trainings	30
2.5.5	Transfer in den Alltag	30
2.5.6	Hilfsmittel für das HRV-Heimtraining	31
2.6	Vasokonstriktionstraining	31
2.6.1	Wie funktioniert das Vasokonstriktionstraining?	31
2.6.2	Gründe für ein Vasokonstriktionstraining bei Migräne	31
2.6.3	Trainingsziele	32
2.6.4	Praktisches Vorgehen	32
2.6.5	Transfer in den Alltag	32
2.7	Elektromyogramm (EMG)	33
2.7.1	Was ist ein EMG?	33
2.7.2	Das EMG-Signal	33
2.7.3	Elektrodenplatzierung	33
2.7.4	Anwendungsgebiete und Trainingsziele des EMG-Feedbacks	33
2.8	Stresstest	34
2.8.1	Was ist ein Stresstest?	34
2.8.2	Praktische Durchführung	34
2.9	HRV-Test	34
2.9.1	Was ist ein HRV-Test?	34
2.10	Anwendungsgebiete: Praxisbeispiele	34
2.10.1	Wie kann Biofeedback als Therapiebaustein eingesetzt werden?	35
	Weiterführende Literatur	40

3	Frequenzbandtraining	41
3.1	Entwicklung des Frequenzbandtrainings	42
3.1.1	Joe Kamiya: Anfänge des Alpha-Trainings	42
3.1.2	Elmer und Alyce Green: Alpha- und Theta-Training	42
3.1.3	Alpha-Theta-Training	46
3.1.4	Barry Sterman: Die Entdeckung des SMR-Trainings und Epilepsie	49
3.1.5	Joel Lubar: SMR- und Theta-Beta-Training bei Aufmerksamkeitsstörungen	50
3.1.6	Vincent Monastra: Der Theta-Beta-Quotient	50
3.1.7	Hödlmoser: SMR-Training und Schlaf	51
3.1.8	Ros: SMR als Training für Chirurgen	51
3.1.9	Davidson und Rosenfeld: Alpha-Training bei Depression	52
3.1.10	Hammond: Beta-SMR-Training bei Depression	53
3.2	Vorgehen beim Frequenzbandtraining	53
3.2.1	Technischer Hintergrund	53
3.2.2	Praktisches Vorgehen	55
	Weiterführende Literatur	57
4	Training der Selbstkontrolle der langsamen kortikalen Potenziale	59
4.1	Langsame kortikale Potenziale	60
4.1.1	Training der Selbstkontrolle der langsamen kortikalen Potenziale	61
4.1.2	Wie entstehen ereigniskorrelierte kortikale Potenziale?	61
4.1.3	Aufbau des Feldpotenzials: Gliazellen	62
4.2	Auswirkungen und Ziele des SCP-Trainings	63
4.2.1	Aktivierung der Gehirnarbeit	63
4.2.2	Wie kommen diese Auswirkungen zustande?	66
4.2.3	Wie verhalten sich die langsamen Potenziale zu den Frequenzen?	67
4.3	Vorgehen beim Training der langsamen kortikalen Potenziale	67
4.3.1	Voraussetzungen für das SCP-Training	67
4.3.2	Bausteine des SCP-Trainings	67
4.3.3	Was muss beachtet werden?	73
4.3.4	SCP-Training: Vorgehen Schritt für Schritt	76
4.3.5	Artefaktverhinderung	77
4.3.6	Beobachtung und Motivierung	79
4.3.7	Anleitung zur Selbstwahrnehmung	79
4.3.8	Transfer in den Alltag	80
4.3.9	Eingangs- und Ausgangstests/Fragebögen	80
4.4	Studien und neue Forschungen	81
4.4.1	Wirksamkeit von SCP-Training	81
4.4.2	Unterschiedliche Ergebnisse in den Studien und in den Einzelverläufen in der Praxis	81
4.4.3	Auswirkungen auf Netzwerkfunktionen	82
4.5	Fallbeschreibungen	82
	Weiterführende Literatur	87
5	Infra Low Frequency (ILF-) Neurofeedback	91
5.1	Funktionsweise des Infra-Low-Frequency (ILF) Trainings	92
5.1.1	Ableitungen für das 2-Kanal-ILF-Training	92
5.1.2	Signalverarbeitung	93
5.1.3	ILF-Trainingsfrequenzen	93
5.1.4	Management sprunghafter Amplitudenanstiege im Spektrum	94
5.1.5	Spezifische Effekte durch spezifische Elektrodenplatzierung	94
5.1.6	Feedbackmodalitäten beim ILF-Training	95
5.1.7	Zusammenfassung	96
5.2	Therapieziele des ILF Trainings	96
5.3	Vorgehen in der Praxis	97
5.3.1	Vorbereitung	97
5.3.2	Anzahl und Frequenz der Trainingssitzungen	97

5.3.3	Erfolgskontrolle.	98
5.3.4	Medikamenteneinnahme	102
5.3.5	Weitere Maßnahmen und ärztliche Abklärungen	103
5.3.6	Praktisches Vorgehen von Sitzung zu Sitzung.	103
5.3.7	Bewertung der Ergebnisse und Platzierung weiterer Elektroden	106
5.3.8	Regeln für die Frequenzanpassung weiterer Elektrodenplatzierungen	107
5.3.9	Beendigung des Trainings	109
5.4	Indikationen und Anwendungsgebiete	109
5.4.1	ILF-Training mit Kindern.	110
5.4.2	ILF-Training in der Rehabilitation	110
5.4.3	ILF-Training bei funktionellen Störungen.	110
5.4.4	High-Performance-Training.	111
5.5	Grenzen und Kontraindikationen	111
5.5.1	Schnelle Zustandsänderungen	111
5.5.2	Ausbildung für die ILF-Methode	111
5.5.3	Sichern des Langzeiterfolgs	112
	Weiterführende Literatur	112
6	Neuere Ansätze im Neurofeedbacktraining	113
6.1	Quantitative EEG-Analyse	114
6.1.1	Funktionsweise der QEEG-Analyse	114
6.1.2	Wichtige Maße im QEEG.	114
6.1.3	Verständnis und häufiges Missverständnis bei der QEEG-Analyse	116
6.2	Live-Z-Score-Training (Echtzeit-Z-Wert-Training)	116
6.2.1	Funktionsweise des Live-Z-Score-Training	116
6.2.2	Trainingsziel.	117
6.2.3	Therapeutisches Vorgehen	117
6.2.4	Kontraindikationen	118
6.2.5	Evidenznachweis	118
6.3	LORETA-Neurofeedback	119
6.3.1	LORETA – Ein EEG-basiertes dreidimensionales bildgebendes Verfahren	119
6.3.2	Multiple Perspektiven auf das Gehirn mit LORETA.	120
6.3.3	Analyse von neuronalen Netzwerken mit LORETA.	120
6.3.4	Verschiedene Verfahren und therapeutisches Vorgehen.	121
6.4	Phänotyp-geleitetes Neurofeedbacktraining	122
6.5	HEG-(Hemoenzephalographie-) Training	123
6.5.1	Funktionsweise des HEG-Trainings?	123
6.6	Neurostimulation	124
6.6.1	Wirkungs- und Funktionsweisen der verschiedenen Stimulationsverfahren	124
6.6.2	Kombination mit Neurofeedback	127
6.6.3	Gefahren	127
6.6.4	Rechtliches.	127
6.7	Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)	128
6.7.1	Funktionsweise des fMRT-Neurofeedback?	128
	Weiterführende Literatur	128
7	HEMI-KINEMATICS-BIO-CONTROL (H.B.B.C)	131
7.1	Einführung: EMG-Biofeedback	133
7.1.1	Elektromyogramm, Elektromyographie (EMG)	133
7.1.2	Ableitungspositionen	133
7.1.3	Hemi Kinematic Bio Control (H.B.B.C).	134
7.2	Neurophysiologie vs. Neuropathologie	134
7.2.1	Rückenmarksgrau: 1. Sensomotorischer Regelkreis (1. SMRK)	134
7.2.2	Assoziierte Bewegungen (AB) vs. assoziierte Reaktionen (AR)	136
7.2.3	Rückenmarksgrau: 2. SMRK	139
7.2.4	Neuromuskuläre Innervation/Muskelfasertypen	141

7.2.5	Muskuläre Balance vs. Dysbalance	145
7.2.6	Sensomotorische Entwicklung (Auszüge), Hirnreifung und Alterung	147
7.2.7	Muskuloskeletale Aufrichtung der WS	149
7.2.8	„The key to hemiplegia?“	152
7.2.9	Hirnstamm: 3. SMRK – Gleichgewicht	156
7.2.10	Vegetative Parameter	160
7.2.11	Subkortikale und kortikale Zentren („Abb. 7.1 4 und 5), 4. und 5. SMRK	162
7.2.12	Basalganglien und limbisches System: 4. SMRK	162
7.2.13	Neokortikale Areale: 5. SMRK	165
7.3	Bahnung der Hantierfunktionen.	165
7.3.1	Einnehmen der tonischen Grundspannung	169
7.3.2	Passive Bewegungen	171
7.3.3	Assistive Bewegungen	172
7.3.4	Aktive Bewegungen	173
7.4	EMG-Biofeedback bei Schmerzen	174
7.4.1	Der europäische Rücken – Rückenschmerzen	174
7.4.2	Chronische Schmerzen	177
7.4.3	Chronische Rückenschmerzen bei linksseitiger Hemiplegie	177
7.4.4	Chronischer Spannungskopfschmerz bei Stand- und Gangataxie	180
7.4.5	Schulterschmerz	182
7.5	H.B.B.C: Befunde, Effekte, Vergleiche.	183
7.5.1	Eingangs-/Ausgangstest	183
7.5.2	Studie zum Verfahren: H.B.B.C	185
7.6	H.B.B.C: Ziele, Vorgehensweise, Fallbeispiele.	187
7.6.1	Ziele der H.B.B.C	187
7.6.2	Vorgehensweise der H.B.B.C	187
7.6.3	Neurologische Störungsbilder: Fallbeispiele	188
7.6.4	Effekte: 20 Jahre nach dem Ereignis	213
7.7	ICF	217
7.7.1	Die Konzepte der ICF	217
7.7.2	ICF-Orientierung der H.B.B.C	217
7.8	Resümee.	220
7.8.1	H.B.B.C-Therapie im klientenzentrierten Betätigungsfeld	222
7.8.2	Ausblick	222
	Weiterführende Literatur	223

II Indikationen, Anwendungen und Fallbeispiele von Biofeedback und Neurofeedback

8	Einführung in die praktische Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback	227
8.1	Hintergrund	228
8.2	Fallbeschreibungen	228
8.3	Psychoedukative Wirkung des Biofeedbacks	228
8.4	Phasen der Biofeedbacktherapie	229
	Weiterführende Literatur	230
9	Psychische Störungen in der Kindheit und Adoleszenz	233
9.1	Aufmerksamkeitsdefizitstörung mit oder ohne Hyperaktivität (ADS/ADHS)	234
9.2	Oppositionelles Verhalten	238
9.2.1	Erklärungsmodell	238
9.2.2	Methoden und Therapieziele	240
9.3	Autismus-Spektrum-Störung (ASD)	244
9.3.1	Erklärungsmodell	244
9.3.2	Methoden und Therapieziele	244
	Weiterführende Literatur	247

10	Angststörungen	249
10.1	Angststörungen und Panikattacken	250
10.1.1	Erklärungsmodell	250
10.1.2	Methoden und Therapieziele	250
10.2	Phobien	251
10.2.1	Erklärungsmodell	252
10.2.2	Methoden	252
10.3	Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS)	253
10.3.1	Erklärungsmodell	253
10.3.2	Methoden	253
	Weiterführende Literatur	255
11	Affektive Störungen	257
11.1	Depressionen	258
11.1.1	Erklärungsmodell	258
11.1.2	Methoden	258
	Weiterführende Literatur	259
12	Chronische Schmerzen	261
12.1	Migräne	262
12.1.1	Erklärungsmodell	262
12.2	Spannungskopfschmerz	264
12.2.1	Erklärungsmodell	264
12.3	Fibromyalgie	266
12.3.1	Erklärungsmodell	266
	Weiterführende Literatur	268
13	Neurologische Störungen	269
13.1	Epilepsie	270
13.1.1	Erklärungsmodell	270
13.1.2	Methoden und Therapieziele	270
13.2	Schlaganfallrehabilitation	272
13.2.1	Erklärungsmodell	272
13.2.2	Methoden und Therapieziele	272
	Weiterführende Literatur	274
14	Biofeedback und Neurofeedback bei Abhängigkeitserkrankung	275
14.1	Neurobiologie und Sucht	276
14.2	Behandlungsangebot Biofeedback und Neurofeedback in der stationären und ambulanten Suchttherapie	279
14.3	Peripheres Bio-Neurofeedback im Therapiealltag bei drogenabhängigen Frauen und Männern	279
14.3.1	Schwerpunkt: Atemtraining kombiniert mit der Herzratenvariabilität	279
14.3.2	Schwerpunkt: Training der elektrodermalen Aktivität (Hautleitwert)	280
14.3.3	Schwerpunkt: Training der Handtemperatur	280
14.4	Neurofeedback im Therapiealltag bei drogenabhängigen Frauen und Männern	281
14.5	Fazit	284
	Weiterführende Literatur	284
15	Sonstige Störungen	285
15.1	Hypertonie	286
15.1.1	Erklärungsmodell	286
15.1.2	Methode und Therapieziele	286
15.2	Inkontinenz	289
15.2.1	Erklärungsmodell	289
15.2.2	Methoden und Therapieziele	289

15.3	Schlafstörungen	290
15.3.1	Erklärungsmodell	290
15.3.2	Methoden und Therapieziele	290
15.4	Tinnitus	292
15.4.1	Erklärungsmodell	292
15.4.2	Methoden und Therapieziele	293
	Weiterführende Literatur	294
16	Nichtmedizinische Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback	295
16.1	Einführung	296
16.2	Training vs. Therapie	296
16.3	Wellness	296
16.4	Psychoedukation	297
16.5	Prävention	298
16.6	Peak Performance	299
16.7	Fazit	300
	Weiterführende Literatur	301
	Serviceteil	
	Weiterführende Tipps	304
	Anbieter Adressen Bio-/Neurofeedback (kein Anspruch auf Vollständigkeit)	308
	Stichwortverzeichnis	311

Über die Autoren



Karl-Michael Haus staatl. anerK. Ergotherapeut

Jahrgang 1966

Autor oder Mitautor bei diesen Kapiteln:

- Kapitel 7: H.B.B.C: Biofeedbackverfahren zur Behandlung zentralnervöser Bewegungsstörungen
- Kapitel 9: Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback in der Praxis-Fallbeispiele

Derzeitige Tätigkeit:

- Selbstständig mit zwei ergotherapeutischen Praxen
- Vorträge und Workshops zum Thema Hemi-Kinematic-Bio-Control-Methode (H.B.B.C)
- Neurorehabilitative Fortbildungen für Ergo- und Physiotherapeuten (► www.ergotherapie-haus.de)

Beruflicher Werdegang:

Therapeutischer Werdegang:

1996 Staatsexamen Ergotherapeut

1996–1999 Ergotherapeut, Edith-Stein Fachklinik für Neurologie und Orthopädie

1999–2003 Ausbildungsleitung Ergotherapie, Prof. König und Leider Schulen KL

2003 Selbständiger Ergotherapeut:

Inhaber v. zwei ergotherapeutischen Praxen in Landau/Pfalz

Dozent an der Fachschule für Ergotherapie Maximiliansau

Ausrichtung bundes- u. europaweiter Fortbildungen im Bereich Neurologie

(Schwerpunkt: Schlaganfall, MS, Parkinson, sowie Bio- u. Neurofeedback)

s. ► www.ergotherapie-haus.de/Kurse

Berufliche Fort- u. Weiterbildung:

1999 Zertifizierter Bobath-Therapeut

2000 Bobath-Aufbaukurs: Behandlung Hemiplegie und andere neurologische Erscheinungsbilder

2001 Staatl. anerkannter Lehrer für Gesundheitsfachberufe

2001 Bobath-Aufbaukurs: Behandlung Erwachsener mit Hemiplegie

2002 Zertifizierter AD(H)S Trainer n. Lauth & Schlottke

2003 Bobath-Aufbaukurs: Behandlung Erwachsener mit Hemiplegie

2006 Lehrtherapeut für die „Sensorische Integrationstherapie“ (Kinderheilkunde)

2007 Klinischer Neuro- und Biofeedbacktherapeut

2009 Zertifizierter Neurofeedbacktherapeut

2017 Sektoraler Heilpraktiker „Ergotherapie“

Veröffentlichungen:

Neurophysiologische Behandlung Erwachsener, 3., Überarbeitete Auflage 2014, Springer Verlag

Praxisbuch Biofeedback und Neurofeedback, Haus et al, 2., Überarb. Auflage 2016, Springer Verlag

ca. 20 Fachartikel v. 2001–2014, s. ► www.ergotherapie-haus.de/Publikationen

Vorträge „H.B.B.C“:

- 2010 Universität Tübingen
- 2012 Ergotherapiekongress Kassel
- 2012 Jahrestagung der DGBfb (Deutschen Gesellschaft für Biofeedback), München
- 2015 Neuro-Rehabilitation im Alltag, Jahrestagung der MS-Gesellschaft, Dillingen
- 2018 Tag gegen Schlaganfall, Konferenz Ergotherapie – Rehazenter, Luxemburg
- 2019 Fachmesse für Therapie, Rehabilitation und Prävention, Leipzig



Carla Held Dipl.-Psych., Psychologische Psychotherapeutin, Supervisorin

Jahrgang 1967

Autorin oder Mitautorin bei diesem Kapitel:

- Kapitel 10: Biofeedback und Neurofeedback bei Abhängigkeitserkrankungen

Derzeitige Tätigkeit:

- Niedergelassen in eigener Psychotherapeutischer Praxis seit Februar 2014
- Teilzeit in der Adaption der Fachklinik Ludwigsmühle

Beruflicher Werdegang:

- 1989–1999 Studium der klinischen Psychologie und Kommunikationspsychologie
- 1999–2004 Ausbildung zur Psychologischen Psychotherapeutin in klinischer Verhaltenstherapie mit Erteilung der Approbation als Psychologische Psychotherapeutin
- 2006–2008 Weiterbildung zur verhaltenstherapeutisch orientierten Supervisorin
- 2009–2010 Weiterbildung zur Biofeedback und Neurofeedback Therapeutin
- Seit 1993 diverse Lehr- und Referententätigkeiten



Dr. phil. Axel Kowalski Dipl.-Psych

Jahrgang 1965

Autor oder Mitautor bei diesen Kapiteln:

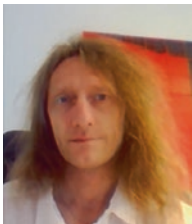
- Kapitel 8: Nichtmedizinische Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback
- Kapitel 9: Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback in der Praxis-Fallbeispiele

Derzeitige Tätigkeit:

- NeuroFit GmbH (Praxis Krefeld):
- Psychotherapie nach HPG
- Bio-/Neurofeedbacktherapeut

Beruflicher Werdegang:

- Studium der Psychologie in Düsseldorf mit Abschluss Diplom
- Promotion zum Dr. phil an der Universität Wuppertal über „Negatives Priming“
- DGBfb e.V.: Lehrtherapeut und Supervisor (Neurofeedback)
- FHÖV-NRW (Standort: Duisburg): Lehrbeauftragter im Nebenamt für das Fach Psychologie für die Bereiche Polizeivollzugsdienst, Kommunalen Verwaltungsdienst, Staatsverwaltung
- 2003–2007: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Universitätsklinikum Tübingen
- Gründungsmitglied und Dozent der Akademie für Neurofeedback (AfN, ► www.akademie-neurofeedback.de)
- Mitglied des Vorstands und Dozent der Deutschen Gesellschaft für Biofeedback (DGBfb e.V., ► www.dgbfb.de)
- Kooperation mit der Fachhochschule Mönchengladbach und der Universität Köln bei der Behandlung von Aufmerksamkeitsstörungen



Dr. phil. Andreas Kromholz Dipl.-Psych

Jahrgang 1968

Autor oder Mitautor bei diesen Kapiteln:

- Kapitel 1: Biofeedback und Neurofeedback
- Kapitel 3: Frequenzbandtraining
- Kapitel 9: Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback in der Praxis- Fallbeispiele

Derzeitige Tätigkeit:

- NeuroFit GmbH (Praxis Hagen):
- Psychotherapie nach HPG
- Bio-/Neurofeedbacktherapeut

Beruflicher Werdegang:

- Ausbildung zum Krankenpfleger
- Ausbildung zum Rettungssanitäter
- Studium der Psychologie in Wuppertal mit Abschluß Diplom
- Promotion zum Dr. phil an der Universität Wuppertal
- DGBfb e.V.: Lehrtherapeut und Supervisor (Neurofeedback, Biofeedback)
- FHÖV-NRW (Standorte: Hagen, Dortmund): Lehrbeauftragter im Nebenamt für das Fach Psychologie für die Bereiche Polizeivollzugsdienst/Kommunalen Verwaltungsdienst/Staatsverwaltung
- 2001–2009: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Wuppertal
- Gründungsmitglied und Dozent der Akademie für Neurofeedback (AfN, ► www.akademie-neurofeedback.de)
- Dozent der Deutschen Gesellschaft für Biofeedback (DGBfb e.V., ► www.dgbfb.de)
- Dozent im Rettungsdienst (PSU)



Dr. Manfred Nowak

Autor oder Mitautor bei diesem Kapitel:

- Kapitel 10: Biofeedback und Neurofeedback bei Abhängigkeitserkrankungen

Psychiatrie-Kinder-Jugendpsychiatrie-Psychotherapie
Suchtmedizin-Verkehrsmedizin

- 1971–1977: Medizinstudium in München
- 1977–1982: Facharztausbildung Psychiatrie-Kinder- und Jugendpsychiatrie-Psychotherapie Pfalzkrankenhaus Klingenstein
- 1981–2011: Aufbau der Fachklinik Ludwigsühle und 8 weiterer Einrichtungen im Therapieverbund Ludwigsühle
- 01.12.2011: Abgabe Chefarzt und Geschäftsführung,
 - **Aktuell**
 - Selbstständige Schwerpunktpraxis Sucht und ADHS,
 - **Psychotherapeutische Ausbildung**
 - Ausbildung Psychoanalyse Heidelberg, Tiefenpsychol. Ausbildung,
 - Ausbildung in systemischer und Verhaltenstherapie, Ausbildung in
 - Körpertherapie nach Dürckheim
 - Zusatzausbildungen: Verkehrsmedizin und Grundversorgung Sucht Ausbildung in Biofeedback und Neurofeedback;
 - GCP-Ausbildung

Durchführung des Curriculums zur Grundversorgung Sucht seit 20 Jahren

Aktuelle Ämter und Mitgliedschaften

Vorsitzender des wissenschaftlichen Suchtbeirates der Landesärztekammer Rheinland- Pfalz seit 29 Jahren

Gutachter der Landesärztekammer für suchtkranke Ärzte

Mitglied des SubstitutionRats Sanofi

Themen von Veröffentlichungen und Forschungsarbeiten

Buchautor Drogensucht

Coautor der Broschüre ADHS und Sucht

Autor Compendium für Substitutionstherapie



Dr. med. Edith Schneider

Jahrgang 1946

Autorin oder Mitautorin bei diesen Kapiteln:

- Kapitel 3: Frequenzbandtraining
- Kapitel 4: Training der Selbstkontrolle der langsamen kortikalen Potenziale
- Kapitel 9: Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback in der Praxis – Fallbeispiele

Derzeitige Tätigkeit:

- Seit 1982: Freie Praxis als Heilpraktikerin
- Seit 1987: Freie Praxis als Ergotherapeutin
- Seit 2006: Privatpraxis als Ärztin
- Seit 2006: Privatpraxis für Biofeedback, Neurofeedback und Ergotherapie

Beruflicher Werdegang:

- Studium Kunst und Kunsterziehung, University of Nebraska, Kearney Campus, Kearney, Nebraska, USA (BA in Education)
- 1974–1975: Kearney Day Care Center 1974 bis 1975
- 1976–1978: Programmkoordinator Beatrice State Developmental Center, Beatrice, Nebraska, USA
- 1978–1986: Schule für Ergotherapie am Berufsbildungswerk des DGB, Dozentin und stellvertretende Schulleiterin
- Staatliche Anerkennung als Ergotherapeutin
- Studium der Humanmedizin Eberhard Karls Universität Tübingen
- 2008: Anerkennung Biofeedbacktherapeutin DGBfB
- 2012: Anerkennung Neurofeedbacktherapeutin DGBfB



Gert Strauß staatl. anerk. Ergotherapeut

Jahrgang 1963

Autor oder Mitautor bei diesen Kapiteln:

- Kapitel 4: Training der Selbstkontrolle der langsamen kortikalen Potenziale
- Kapitel 6: Neuere Ansätze
- Kapitel 11: Weiterführende Tipps

Derzeitige Tätigkeit:

- Seit 1995: Praxis für Ergotherapie ► www.ergotherapie-strauss.de
- Seit 2007: Anwendung von unterschiedlichen Bio- und Neurofeedbackverfahren

Beruflicher Werdegang:

- Ausbildung zum Ergotherapeuten mit staatlichem Abschluss 1989
- Mehrjährige Tätigkeit in der Schwerstbehindertenförderung
- Freier Mitarbeiter in einer ergotherapeutischen Praxis
- Zertifizierungen in der Sensorischen Integrationstherapie nach Richtlinien des DVE
- Bobath Therapeut (IBITA)
- Fortbildung zur Behandlung von Kindern mit Teilleistungsstörungen und ADHS
- 2009: Biofeedbacktherapeut (DGS)
- 2010: Neurofeedbacktherapeut (IFEN)
- 1998: Mitglied im deutschen Verband der Ergotherapeuten (DVE)
- 2010: Funktionsträger als Vorsitzender der AG Bio-/Neurofeedback im DVE
- Veröffentlichungen zum Thema Bio-/Neurofeedback in der Verbandszeitschrift „Ergotherapie- und Rehabilitation“



Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Meike Wiedemann

Jahrgang 1967

Autorin oder Mitautorin bei diesen Kapiteln:

- Kapitel 1: Biofeedback und Neurofeedback
- Kapitel 2: Peripheres Biofeedback
- Kapitel 5: Infra Low Frequency (ILF) Neurofeedback
- Kapitel 9: Anwendung von Biofeedback und Neurofeedback in der Praxis- Fallbeispiele
- Kapitel 10:
- Kapitel 12:
- Kapitel 13:
- Kapitel 15:

Derzeitige Tätigkeit:

- Seit 1996: Dozentin für Biofeedback und Neurofeedback an der Universität Hohenheim
- Seit 2002: Heilpraktikerpraxis für Neurofeedback und Hypnose ► www.biofeedback-center.de
- Leiterin der Neurofeedback Ausbildung bei EEGInfo Europa
- Ausbildung von Neurofeedbacktherapeuten

Beruflicher Werdegang:

- Studium der Biologie mit Abschluss Diplom
- 1995: Forschungsaufenthalt in Sao Paulo, Universität Campinas am Institut für Biomedical Engineering
- 1995–1999: Promotion zum Dr. rer. nat.
- 1999–2011 Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Universität Hohenheim
Forschungsschwerpunkt: Neurophysiologie
- 1999: Erlaubnis zur Ausübung der Heilkunde
- 2002: Privatpraxis für Neurofeedback und Hypnose
- 2010: Habilitation für das Fachgebiet Membranphysiologie
- seit 2011: Wissenschaftliche Mitarbeiterin bei BEE Medic GmbH, zuständig für den Neurofeedbackbereich EEGInfo

Grundlagen, Methoden und Durchführung von Biofeedback und Neurofeedback

Inhaltsverzeichnis

- Kapitel 1 Biofeedback und Neurofeedback – 3
- Kapitel 2 Peripheres Biofeedback – 23
- Kapitel 3 Frequenzbandtraining – 41
- Kapitel 4 Training der Selbstkontrolle der langsamen kortikalen Potenziale – 59
- Kapitel 5 Infra Low Frequency (ILF-) Neurofeedback – 91
- Kapitel 6 Neuere Ansätze im Neurofeedbacktraining – 113
- Kapitel 7 HEMI-KINEMATICS-BIO-CONTROL (H.K.B.C) – 131



Biofeedback und Neurofeedback

- 1.1 Was ist Biofeedback? – 4**
 - 1.1.1 Feedback – 4
- 1.2 Was ist Neurofeedback? – 6**
 - 1.2.1 Aufgaben des Gehirns – 6
 - 1.2.2 Bau und Organisation des Gehirns – 6
 - 1.2.3 Aus was besteht das Gehirn? – 10
 - 1.2.4 Die Entdeckung des Elektroenzephalogramms – 16
 - 1.2.5 Was wird mit dem EEG gemessen? – 16
- 1.3 Lerntheoretische Grundlagen – 19**
 - 1.3.1 Operantes Konditionieren – 19
 - 1.3.2 Transfer in den Alltag: Klassisches Konditionieren – 19
- 1.4 Können alle Hirnstrukturen über Neurofeedback beeinflusst werden? – 20**
 - Weiterführende Literatur – 21**

1.1 Was ist Biofeedback?

Der Begriff „Biofeedback“ bezieht sich auf die Rückmeldung körperlicher Prozesse, die normalerweise immer ablaufen und reguliert werden, aber nicht immer bewusst wahrnehmbar sind. Als Beispiel soll hier die **Herztätigkeit** dienen: Das Herz schlägt in Ruhe 60- bis 80-mal/Minute, ohne dass wir uns 60- bis 80-mal/Minute daran erinnern müssen, unser Herz schlagen zu lassen. Bei Anforderungen oder körperlicher Anstrengung nimmt die Herzrate deutlich zu, ohne dass wir uns bewusst darum kümmern müssen. Weitere **körperliche Prozesse** sind z. B.

- die Muskelaktivität,
- die Schweißdrüsenaktivität,
- die Atmung oder
- die Gehirnaktivität.

Wie aktiviert unsere körperlichen Prozesse zu einem bestimmten Zeitpunkt sind, ist uns meist nicht zugänglich. Die Herztätigkeit können wir über das Fühlen des Pulses bestimmen, aber die Spannung unserer Muskulatur beispielsweise können wir nicht ohne Hilfsmittel beschreiben. Häufig werden uns Veränderungen körperlicher Prozesse erst dann bewusst, wenn sie unangenehm werden (hohe Muskelspannung kann als Schmerz bemerkt werden) oder sogar schädlich auf den Organismus einwirken (chronischer hoher Blutdruck kann Herzschäden hervorrufen). Das ausgewogene **Zusammenspiel aller körperlichen Prozesse** spielt eine wichtige Rolle für das körperliche und das psychische Wohlbefinden. Bemerkten wir bei uns ein „Herzrasen“ ohne offensichtlichen Grund, kann das körperliche Unbehagen (z. B. Unruhe, Getriebensein) auslösen, ebenso können psychische Prozesse ein negatives Empfinden beinhalten („Ich krieg gleich einen Herzinfarkt.“). Biofeedback bietet die Möglichkeit, den Zustand, aber auch die Veränderung und Veränderbarkeit dieser körperlichen Prozesse „sichtbar“ zu machen.

In diesem Sinne ist Biofeedback ein **Prozess**, der unserem Geist mithilfe von Messinstrumenten zusätzliche Informationen über Körperprozesse liefert und so Körper und Geist verbindet. Mit etwas Übung können wir lernen, die rückgemeldeten Körperprozesse, später dann auch ohne Geräte, besser zu regulieren. Diese Hilfe zur verbesserten Selbstregulation psychischer und physischer Prozesse kann in vielen Fällen ein wichtiger Bestandteil zur Lösung gesundheitlicher Probleme sein. Das Beispiel „Spannungskopfschmerz“ soll die Zusammenhänge verdeutlichen (■ Abb. 1.1).

Beispiel

Beim Spannungskopfschmerz (► Abschn. 12.2) wird zwischen einem episodischen und einem chronischen Schmerz unterschieden. Eine wichtige Rolle bei der Ätiologie und Pathogenese spielen muskuläre Verspannungen, die sich besonders deutlich an **drei Muskeln** zeigen:

- M. frontalis,
- M. masseter und
- M. trapezius.

Zu Beginn der Behandlung wird die Muskelspannung der beteiligten Muskelpartien in verschiedenen Situationen abgeleitet und dargestellt (■ Abb. 1.1). Dabei ist besonders die Reaktion der Muskulatur unter belastenden Situationen im Sinne einer Stressreaktion wichtig und hilfreich bei der Vermittlung der Zusammenhänge: erhöhte Muskelspannung (z. B. durch Stress) → Schmerz → erhöhte Muskelspannung (z. B. Schonhaltung). Das Feedback soll nun eine Reduktion der Muskelspannung durch Veränderungen im Verhalten in Gang setzen und diese Veränderungen haben belohnende Wirkung.

1.1.1 Feedback

Feedback ist die **Voraussetzung für jede Art von Lernen**. Man stelle sich vor, an einem Keyboard Klavierspielen lernen zu wollen, ohne das Stromkabel anzuschließen. Man kann die Bedeutung der einzelnen Tasten lernen, Fingerübungen machen, Noten lernen usw., doch fehlendes auditives Feedback macht es wesentlich schwieriger, erfolgreich Klavierspielen zu lernen. Ist das Stromkabel eingesteckt und der Lautsprecher eingeschaltet oder spielt man an einem richtigen Klavier, dann kann man mithilfe des auditiven Feedbacks erkennen, ob das Gespielte mit der Melodie im Kopf übereinstimmt. Wenn nicht, dann wird man sofort korrigieren. Ebenso lernt man, die Lautstärke über die



■ **Abb. 1.1** Prinzipien des Biofeedbacks am Beispiel „Spannungskopfschmerz“. (Mit freundl. Genehmigung von Axel Kowalski, Andreas Krombholz)

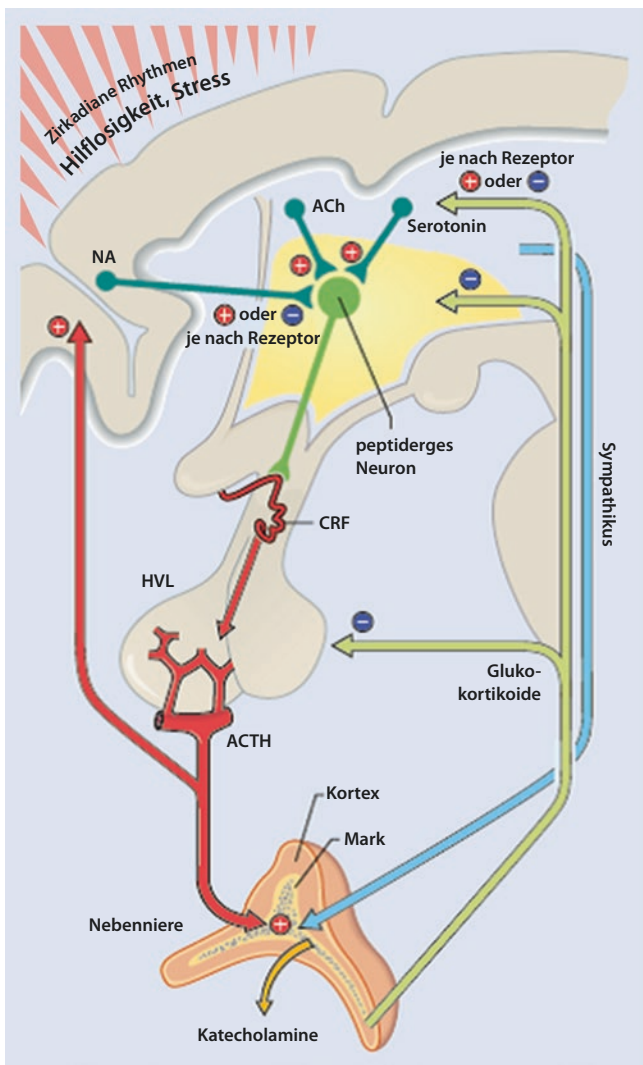
1.1 · Was ist Biofeedback?

Stärke des Tastenanschlags zu regulieren. Durch das (in diesem Falle) auditive Feedback lernt man also zu korrigieren und zu regulieren, um so die Leistungsfähigkeit zu verbessern.

➤ **Wir brauchen für alles, was wir lernen wollen, eine Rückkopplung (= Feedback) zwischen dem Gewollten und dem Erreichten.**

Lernen ist ein ganz natürlicher Prozess, der bewusst oder unbewusst ablaufen kann. Tatsächlich lernt jeder von uns ständig, ohne darüber nachzudenken. Feedback (► Abschn. 1.3) ist dabei ein ganz wichtiger Bestandteil. Unser Gehirn reagiert ständig auf Reize (z. B. Hunger oder Kälte) und lernt teils bewusst, größtenteils unbewusst, mit welcher Reaktion es sinnvoll darauf reagiert.

Regelkreise für Feedbackmechanismen kommen überall im Körper vor (■ Abb. 1.2):



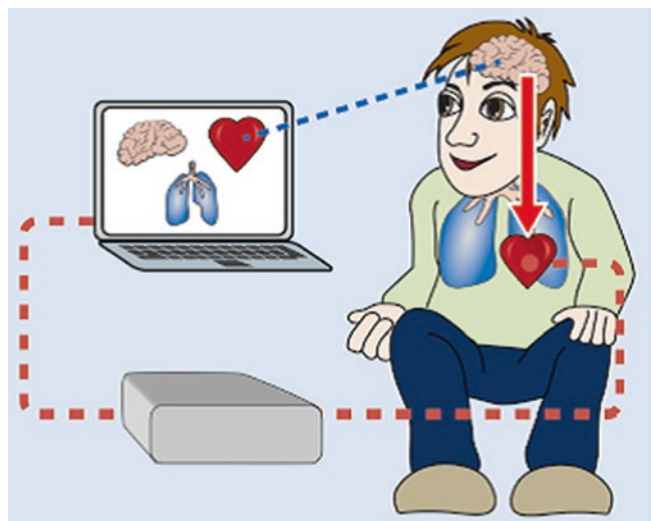
■ **Abb. 1.2** Typischer Regelkreis im Körper am Beispiel des Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrindensystems. *ACh*: Acetylcholin; *ACTH*: adrenokortikotropes Hormon; *CRF*: Corticotropin Releasing Factors; *HVL*: Hypophysenvorderlappen; *NA*: Noradrenalin. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)

Beispiele

- Hormonsystem (Regulation der Hormonausschüttung durch Hypothalamus und Hypophyse),
- Regulierung des Blutzuckerspiegels,
- motorisches System (propriozeptives System, Optimierung der Stützmotorik und Zielbewegung),
- Reflexbögen,
- Somatosensorik (motorische und vegetative Regelkreise),
- Herz-Kreislauf-System (Regulierung des Blutdrucks mit Barorezeptoren als Messfühler),
- Regulierung des Wasserhaushalts,
- Regulierung des Wärmehaushalts,
- Regulierung des O_2 -Partialdrucks im Blut.

Durch Biofeedback bekommt das Gehirn zusätzliche Signale über **Körperfunktionen** und kann so lernen, diese besser zu regulieren. Schließlich ist unser Gehirn darauf spezialisiert, Reize zu empfangen und diese als Information in entsprechende Regelkreise einzubringen, um so die Funktionsfähigkeit zu optimieren (■ Abb. 1.3).

Nehmen wir als Beispiel die **Temperaturregulierung**: Die Hauttemperatur schwankt ständig in Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem jeweiligen psychophysiologischen Zustand, ohne dass man sich dessen bewusst ist. Gibt man nun ein zusätzliches Instrument in Form eines sehr empfindlichen Thermometers in die Hand, können die meisten Personen damit recht schnell lernen, ihre Hauttemperatur zu erhöhen. Interessanterweise können viele Personen nicht genau sagen, wie sie das gemacht haben, aber die zusätzliche Information führt zu einer anderen Temperaturregulierung. Bei manchen Personen erwärmt sich nur die Hand oder sogar nur der Finger, an dem das Thermometer angebracht war, bei anderen generalisiert sich der Prozess und beide Hände (auch die ohne Thermometer) werden wärmer. Die Veränderung der Temperatur funktioniert übrigens in beide Richtungen, die Temperatur kann sowohl erhöht als auch erniedrigt werden. Im therapeutischen Setting wird i. d. R. die Handtemperatur erhöht (► Abschn. 2.4), um Entspannungsreaktionen zu trainieren.



■ **Abb. 1.3** Biofeedback: Wir können jedes Körpersignal in eine gewünschte Richtung verändern, wenn wir Feedback über die Veränderung erhalten

Im Prinzip kann in ähnlicher Art und Weise gelernt werden, jede Körperfunktion, über die man ein Feedback erhält, zu verändern.

➤ **Biofeedback ist der Überbegriff für alle Möglichkeiten, Körpersignale zu messen und Veränderungen zu trainieren.**

In ▶ Kap. 2 wird auf verschiedene periphere Körpersignale eingegangen, die in der Praxis häufig zum Biofeedbacktraining verwendet werden. Eine besondere Form des Biofeedbacks, nämlich das Feedback des Elektroenzephalogramms (EEG), stellt das **Neurofeedback** dar (▶ Abschn. 1.2). In den ▶ Kap. 3, 4, und 5 werden verschiedene Neurofeedbackverfahren im Detail dargestellt. Die für das Bio- und Neurofeedback benötigte Technik ist in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

1.2 Was ist Neurofeedback?

Neurofeedback ist das Feedback von Gehirnaktivität, gemessen im EEG. Um das Potenzial von Neurofeedback zu verstehen, ist es zunächst sinnvoll, sich darüber Gedanken zu machen,

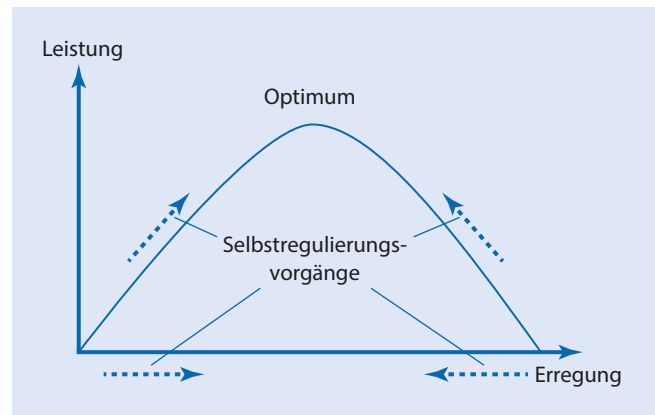
- welche Aufgaben das Gehirn hat,
- wie es organisiert ist und
- was im EEG gemessen werden kann.

Deshalb sollen an dieser Stelle zunächst einige Grundlagen zur Funktionsweise des Gehirns zusammengefasst werden. Grundlegende Kenntnisse über die Gehirnfunktionen sind für ein erfolgreiches Neurofeedbacktraining essenziell.

1.2.1 Aufgaben des Gehirns

Die primäre Aufgabe unseres Gehirns ist es, angemessen auf unsere Umwelt zu reagieren, um im biologischen Sinne die besten Überlebenschancen zu haben. Dazu nimmt das Gehirn ständig eine Unmenge von Informationen, sowohl aus der Umwelt als auch aus dem eigenen Körper wahr. Diese Fülle von Informationen muss das Gehirn sinnvoll verarbeiten, muss entscheiden, welche Informationen wichtig sind und welche unwichtig. Die Wichtigen müssen bewertet und aus dem Hintergrundrauschen herausgefiltert, verstärkt und weiterverarbeitet werden. Das geschieht sowohl auf chemischem als auch auf elektrischem Weg. Danach richten sich dann unser Verhalten, die Emotionen, das Denken und Handeln. Eine sinnvolle Informationsverarbeitung im Gehirn und damit die Funktionsfähigkeit hängen allerdings entscheidend von dem Erregungslevel im Gehirn ab (■ Abb. 1.4). Sowohl Zustände zu niedriger Erregung als auch zu hoher Erregung unterbinden höhere Hirnfunktionen.

Deshalb ist es eine der wichtigsten Aufgaben für das Gehirn, ständig die feine Balance zwischen Erregung und Hemmung von Erregung zu halten. Dies gilt auf zellulärer Ebene genauso wie auf Netzwerkebene und für das gesamte Gehirn.



■ **Abb. 1.4** Erregungsleistungskurve und Selbstregulierung. (Mit freundl. Genehmigung der BeeMedic GmbH)

Das Gehirn verwendet sogar die meiste Energie darauf, seinen eigenen Erregungszustand zu regulieren. Im Vergleich zum Ruhezustand erhöht das Gehirn seinen Energiebedarf beim Lösen einer kognitiven Aufgabe gerade mal um 3 %.

➤ **Viele Pathophysiologien im Gehirn sind als Fehlregulierungen in dieser Balance zwischen Erregung und Hemmung von Erregung und den entsprechenden Netzwerkverschaltungen zu verstehen.**

1.2.2 Bau und Organisation des Gehirns

Die **vertikale anatomische Anordnung** des Gehirns entspricht mehr oder weniger auch dem Organisationslevel im Gehirn:

- Die komplizierteren geistigen Prozesse laufen eher in den oberen Regionen ab,
- die unteren Abschnitte sind mehr für die Regulierung der Vitalfunktionen zuständig.

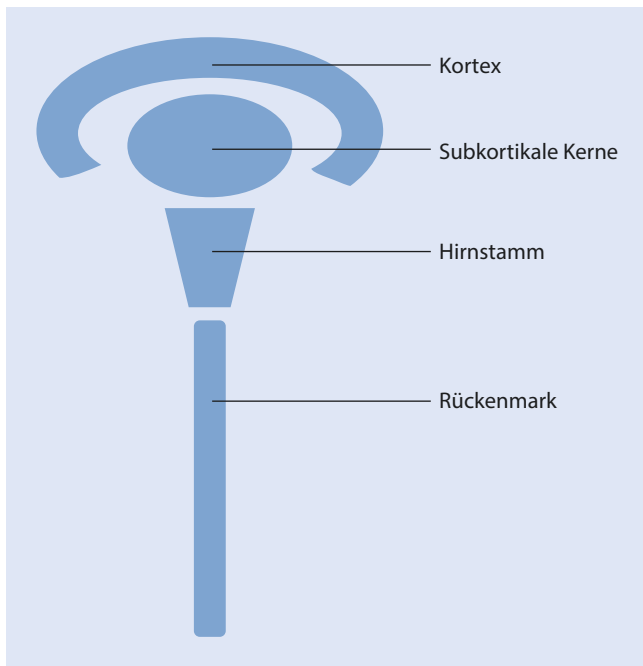
Obwohl die beiden Gehirnhälften morphologisch sehr ähnlich aussehen, unterscheiden sie sich sehr in der Funktionalität, sodass neben der vertikalen Organisation auch die **Rechts-Links-Achse** eine große Rolle spielt. Die Kenntnis dieser Verhältnisse ist für das Neurofeedbacktraining von großer Bedeutung, denn die Positionierung der Elektroden hat einen großen Einfluss auf den Effekt des Trainings.

Vertikale Organisation

Zum besseren Verständnis von Neurofeedbacktrainingseffekten macht es Sinn, sich den vertikalen Aufbau des ZNS etwas zu vereinfachen (■ Abb. 1.5).

■ Kortex

Der Cortex cerebri (Großhirnrinde) stellt wie die Rinde eines Baums die äußere Struktur des Gehirns dar. Er besteht aus 6 Schichten (■ Abb. 1.6), trotzdem ist er nur 2–3 mm dick. Damit mehr Zellen in dem eng begrenzten Raum untergebracht werden können, ist der Kortex stark gefaltet angeordnet. Da-



■ **Abb. 1.5** Blockdarstellung der vereinfachten vertikalen ZNS-Organisation. (Mod. nach Othmer 2019)

durch ergeben sich auch die typischen Windungen und Furchen. Würde man die Gehirnrinde ganz auffalten und flach ausbreiten, ergäbe das ungefähr eine Fläche von 2 m². Der Kortex besteht aus grauer Substanz, die sich farblich von der weißen Substanz darunter abhebt. Über die Anzahl der **Neuronen** im Kortex gibt es keine genauen Angaben, Schätzungen gehen von 10–50 Mrd. Nervenzellen aus.

Neben den Nervenzellen kommen im Kortex v. a. noch **Gliazellen** vor. Sie werden häufig als Stützzellen bezeichnet, weil man ihnen ursprünglich nur eine Stütz- und Haltefunktion zuordnete. In den letzten Jahren zeigt sich aber in der Forschung immer deutlicher, dass die Gliazellen in einem viel größeren Maße als vermutet an der Informationsverarbeitung im ZNS teilhaben, außerdem haben sie großen Anteil an der Aufrechterhaltung der osmotischen Verhältnisse im Nervengewebe. Insgesamt kommen im Gehirn mehr Gliazellen als Neuronen vor, allerdings haben die Nervenzellen das größere Volumen.

Alle Prozesse, die unter dem Begriff **kognitive Prozesse** zusammengefasst sind, werden durch das Kommunizieren der Neurone im Kortex möglich, z. B. Denken, Planen, Problemlösen etc. Auch Charaktereigenschaften oder das Bewusstwerden und Regeln von Emotionen eines Menschen benötigen neuronale Kommunikation.

■ **Subkortikale Kerne (Nuklei)**

Direkt unterhalb des Kortex finden sich viele funktionale Einheiten, die aus **Ansammlungen vieler Nervenzellkörper** bestehen. Das sind die sog. subkortikalen Kerne oder Nuklei. Ihre Axone (► Abschn. 1.2.3, „Nervenzellen“) projizieren in andere Gehirnbereiche, wie z. B. zu anderen Nuklei, nach kranial zum Kortex oder nach kaudal in den Hirnstammbe-

reich. Die Verbindungsfasern zu anderen Bereichen erscheinen als weiße Substanz, die sich farblich von den grauen Bereichen der Nervenzellkörper abgrenzt.

Es gibt viele spezifische subkortikale Bereiche, die an der Verarbeitung sensorischer, motorischer und limbischer Funktion beteiligt sind. Diese tieferen Teile des ZNS haben großen Einfluss auf unser Verhalten, obwohl diese Steuerung meist unter der Schwelle der bewussten Wahrnehmung bleibt.

■ **Hirnstamm**

Der tiefer gelegene Hirnstamm reguliert grundlegend unsere Vitalfunktionen. Er leitet Informationen von und zum Rückenmark weiter und kontrolliert unseren grundlegenden Erregungslevel sowie die Schlaf-Wach-Zyklen.

■ **Rückenmark**

Das Rückenmark gehört auch zum ZNS. Es zieht sich hinunter bis in den untersten Teil der Wirbelsäule und ist von denselben Häuten umgeben wie das Gehirn. Im Rückenmark werden ein- und ausgehende Informationen von und in den Körper verschaltet. Einige Informationen werden auch auf diesem Level koordiniert (z. B. einfache Reflexkreise).

Funktionelle Anatomie

■ **Zusammenspiel der verschiedenen Ebenen**

Es gibt wohl keinen Bereich im Gehirn, der für sich alleine arbeitet. Alles was wir wahrnehmen, fühlen, denken, handeln ist immer ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Netzwerke und verschiedener Gehirnbereiche (■ Abb. 1.7).

Wie arbeiten also die verschiedenen Organisationsebenen des ZNS zusammen? Am Beispiel der Verarbeitung ein- (Input/afferente) und ausgehender (Output/efferente) Informationen sollen die verschiedenen Anteile der Informationsverarbeitung dargestellt werden (■ Abb. 1.8).

Auf allen Ebenen des ZNS wird der **sensorische Input** eher in den hinteren Bereichen verarbeitet, und die **exekutiven Funktionen** gehen von den vorderen Bereichen aus.

Im **Rückenmark** kommt die sensorische Information aus der Körperperipherie im Hinterhorn an und wird dann zur Verarbeitung an höhere Level in Richtung Gehirn weitergeleitet. Im Vorderhorn verlassen die ausgehenden Informationen, z. B. Motoneurone, das Rückenmark. Einige Funktionen werden direkt auf Rückenmarksebene koordiniert, bei anderen sind durch die Top down-Kontrolle höhere Gehirnebenen involviert.

Der **Hirnstamm** ist an der Verarbeitung sensorischer Information beteiligt und kontrolliert zu großen Teilen den auf die Umwelt orientierten motorischen Output. Vor allem die *Formatio reticularis*, ein langgestrecktes Netzwerk im Hirnstamm, verarbeitet sensorischen Input (z. B. aus den Sensoren von Haut, Muskeln oder Gelenken) und moduliert Informationen von und zum Kortex. Die *Formatio reticularis* hat großen Anteil an der Regulierung des vegetativen Nervensystems (Bottom up-Kontrolle) und der lebenswichtigen Vitalfunktionen wie Atmung, Herzschlag und Schlaf-Wach-Rhythmus.

Die **subkortikalen Kerne** müssen die einkommende Information in Hinblick auf Gefahr und mögliche schnelle Re-

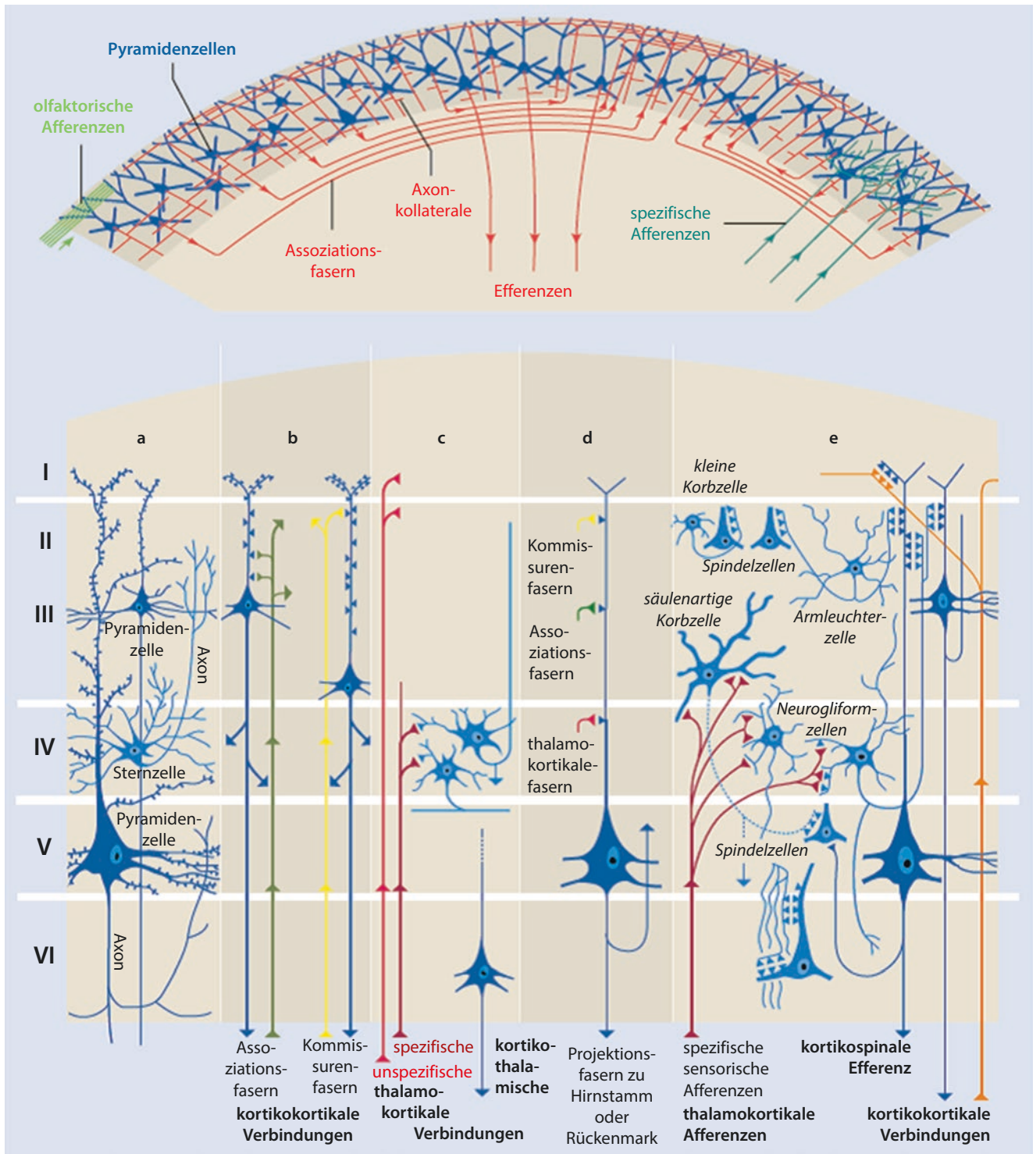


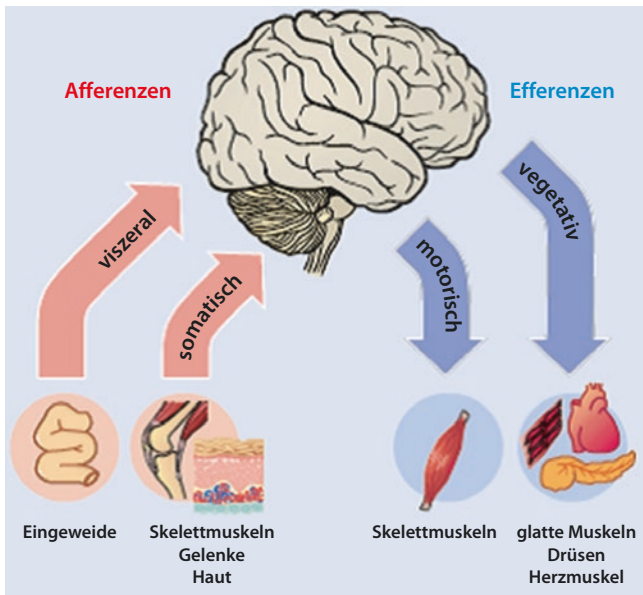
Abb. 1.6 Schematische Darstellung der Kortexschichten I–VI. a: typische Zellen im Kortex. b: kortikokortikale Verknüpfungen. c: thalamokortikale und kortikothalamische Verbindungen. d: verschie-

dene synaptische Eingangszonen von Pyramidenzellen. e: Zusammenschau der Verknüpfung kortikaler Neurone. (Aus Schmidt und Lang 2007)

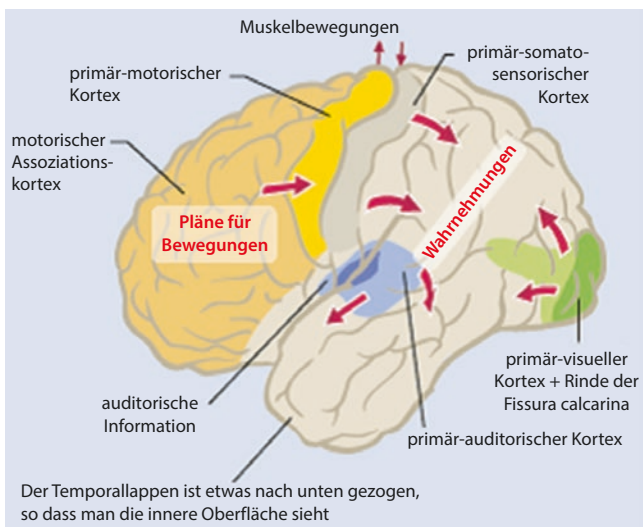
aktionen abschätzen, um uns am Leben zu erhalten. Diese Überlebensreaktionen sind sehr viel schneller als die detaillierte Analyse des sensorischen Inputs auf kortikaler Ebene. Sie haben in der Informationsverarbeitung den Vorrang. Die subkortikalen Kerne beeinträchtigen unsere Wahrnehmung und unser Verhalten enorm.

Der **Kortex** analysiert den sensorischen Input detailliert und wählt einen adäquaten Verhaltensoutput. Eine gute kortikale Kontrolle („top down“) erlaubt uns überlegtes Handeln.

Input- und Output-Funktionen laufen nicht nacheinander, sondern gleichzeitig ab und bedingen sich gegenseitig.



▣ **Abb. 1.7** Afferente und efferente Nervenbahnen. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)



▣ **Abb. 1.8** Zusammenarbeit von sensorischen und motorischen Arealen im Kortex. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)

So steuert die Wahrnehmung die Handlung und die Handlung die Wahrnehmung. Unsere Wünsche und Bedürfnisse beeinflussen beides.

Anteriore (vordere) und posteriore (hintere) Bereiche unseres ZNS arbeiten immer zusammen, z. B. bei der **Steuerung der Bewegung**:

- Die sensorische Information muss mit der motorischen verknüpft werden,
- der präfrontale Kortex organisiert den Plan und
- die limbischen Bereiche setzen die Prioritäten.

Die Wahrnehmung kann dann als gerichteter absichtsvoller Prozess verstanden werden, der von den Bedürfnissen und Erwartungen bestimmt ist.

Wie organisiert das Gehirn nun diese Input- und Output-Funktionen? Wie kontrolliert es die Bereitschaft, etwas wahrzunehmen, und wie werden die Gehirnbereiche für die entsprechenden Reaktionen aktiviert? Dazu müssen verschiedene Erregungszustände reguliert werden.

■ Erregung und Aktivierung

Erregung und Aktivierung sind **Schlüsselkomponenten** in der Zustandsregulierung.

Hirnstamm In erster Linie ist der Hirnstamm für den **generellen Erregungslevel** zuständig. Subkortikale Kerne (wie z. B. der Thalamus oder die Basalganglien) kontrollieren dann die Aktivierung spezifischer Gehirnbereiche, die für die entsprechende Funktion zuständig sind. Das heißt, diese spezialisierten Bereiche machen sich bereit, sensorischen Input aufzunehmen und angemessen darauf zu reagieren. Die Frage, wie sich das Gehirn für die Aktivierung bestimmter Areale bereit macht, führt zum limbischen System.

Limbisches System Das limbische System reguliert **Antrieb und Emotionen**. Dadurch wissen wir, was wir zum Überleben brauchen, es lenkt unsere Wahrnehmung, unser Verhalten und unsere physiologische Regulation auf der Suche nach Sicherheit und Belohnung. In der limbischen Funktion sind vor allem subkortikale Kerne involviert, die sehr schnell Gefahr und Belohnung einschätzen und uns, um zu überleben, schnell reagieren lassen. Der Hirnstamm gibt den emotionalen Grundtonus vor und der Kortex die bewussten Ziele und Pläne.

➤ **Die limbische Funktion ist überlebenswichtig, kann aber zum Problem werden, wenn sie außer Kontrolle gerät.**

Man kann sich das am Beispiel der **posttraumatischen Belastungsstörung** klarmachen: In einer lebensbedrohlichen Situation wird ein lebenserhaltendes Verhalten gelernt, das dann aber noch lange, nachdem die bedrohliche Situation vorüber ist, beibehalten wird. Das führt dazu, dass Personen mit einer posttraumatischen Belastungsstörung auf ihre Umwelt weiterhin so reagieren, als wäre sie lebensbedrohlich. Diese Patienten sind dann nicht in der Lage, ihre unbewussten, inadäquaten Reaktionen zu hemmen, obwohl sie bewusst verstehen, dass diese heftigen, unangemessenen Reaktionen nicht mehr gebraucht werden.

Präfrontaler Kortex Die **inhibitorische** (hemmende) **Kontrolle** ist ein weiterer wichtiger Faktor in der Zusammenarbeit verschiedener Organisationslevel im ZNS. Kortikale Bereiche haben hemmende Kontrolle über niedrigere Gehirnregionen und deren automatisierte Reaktionen. Dies verschafft die nötige Zeit für die detaillierte Analyse sensorischer Information. Dadurch können die verschiedenen Prioritäten und die möglichen Konsequenzen des eigenen Handelns in Betracht gezogen werden, bevor die Reaktion auf die sensorischen Reize ausgeführt wird. Der präfrontale Kortex ist der **höchste Level** in der Organisation der inhibitorischen Kontrolle des ZNS.

➤ **Gute präfrontale Kontrolle ist essenziell für Selbstkontrolle und überlegtes Handeln.**

■ **Funktionelle Areale des Kortex**

Wenn man verschiedene funktionelle Areale des Gehirns in Betracht zieht, muss man zunächst zwischen den Aufgaben der rechten und der linken Gehirnhälfte unterscheiden. Obwohl die beiden Gehirnhälften strukturell ähnlich aussehen und über den Balken (Corpus callosum) sehr eng miteinander kommunizieren, unterscheiden sie sich in ihrer Funktion. Durch die **Kreuzung der Nervenbahnen** werden sensorischer Input und motorischer Output jeweils auf der gegenüberliegenden Seite verarbeitet, d. h.,

- Input von der linken Körperseite projiziert auf die rechte Gehirnhälfte und
- die rechte Seite projiziert auf die linke Gehirnhälfte.

Ebenso geht der motorische Output für die linke Körperhälfte von der rechten Gehirnhälfte aus und umgekehrt.

➤ **Die Entscheidung, wo Elektroden positioniert werden, ist speziell beim Neurofeedbacktraining der sehr langsamen Frequenzen (► Kap. 5) von großer Bedeutung. Die Trainingseffekte der linken und rechten Seite können sehr unterschiedlich sein und müssen bei der Wahl der Elektrodenplatzierung berücksichtigt werden. Bei der Anamnese müssen die Indikatoren für links- oder rechtsseitiges Training sorgfältig herausgefiltert werden.**

Aufgaben der rechten und der linken Gehirnhälfte Die **rechte Gehirnhälfte** ist eher integrativ. Ihr obliegt der Blick für das momentane Gesamtbild und was in jedem Moment um uns herum geschieht, um uns sicher und gut durch die Welt zu navigieren. Die rechte Seite beurteilt aufgrund des sensorischen Inputs, was von uns erwartet wird, und wie wir in das Gesamtbild passen. Die rechte Hemisphäre hilft, uns neue Situationen zu erfassen und neue Fähigkeiten zu erlernen. Die von der rechten Gehirnhälfte gesteuerte Erkundung unserer Umwelt ist vor allem in der frühen Entwicklung von Bedeutung, wenn wir über die Welt um uns herum lernen müssen. Im späteren Leben ist sie wichtig für die Erhaltung der Flexibilität und Kreativität. Die frühe Entwicklung der rechten Gehirnhälfte erlaubt die Entwicklung einer gesunden Selbstregulation. In der frühen Kindheit wird gelernt, sich aus all dem sensorischen Input einen Reim zu machen. Wir lernen, wie wir uns selbst beruhigen, und wie wir in Kontakt mit anderen Menschen treten. Ist diese Entwicklung gestört, kann das zu großen Problemen der grundlegenden Selbstregulation und chronischer Fehlregulation führen. Betrachtet man z. B. das Asperger-Syndrom mit Symptomen wie Schwierigkeiten, mit neuen Situationen und sozialen Interaktionen, beides Funktionen der rechten Gehirnhälfte. Das äußert sich häufig darin, dass Menschen mit Asperger-Syndrom nicht richtig mit anderen kommunizieren können, obwohl sie ausführlich darüber reden, was sie alles wissen. Sie bleiben lieber in gewohnter Umgebung, wiederholen stets bekannte Fähigkeiten und Routinen, was eher Funktionen der linken Gehirnhälfte sind.

Die **linke Gehirnhälfte** ist auf die detaillierte Analyse und Verarbeitung des sensorischen Inputs, die Organisation und die Ausführung bereits gelernter Fähigkeiten spezialisiert. Die linke Gehirnhälfte kennt Regeln und organisiert die einzelnen Schritte, die zur Erreichung von Zielen notwendig sind. Sie steuert die Top down-Kontrolle der Aufmerksamkeit und zielgerichteter Aufgaben. Diese Fähigkeiten sind offensichtlich wichtig für die Schulleistungen. Die linke Gehirnhälfte entwickelt sich später als die rechte, dann, wenn sich auch Sprache und explizites Gedächtnis entwickeln. Die linke Hemisphäre ist auch zuständig für die bewusste verbale Interpretation unserer Lebensgeschichte.

Funktionen der Kortexareale Neben der Aufteilung in die rechte und linke Gehirnhälfte sollten auch die verschiedenen **Funktionen der Kortexareale** in Betracht gezogen werden. Wohlwissend, dass es im ganzen Gehirn keine isolierten Bereiche gibt, die unabhängig von anderen Bereichen funktionieren, kann man sowohl den linken als auch den rechten Kortex in verschiedene funktionelle Areale aufteilen (► Tab. 1.1, ► Abb. 1.9).

1.2.3 Aus was besteht das Gehirn?

Zellen

Das Gehirn besteht hauptsächlich aus **2 Arten von Zellen**, Neuronen (Nervenzellen) und Gliazellen (Stützzellen):

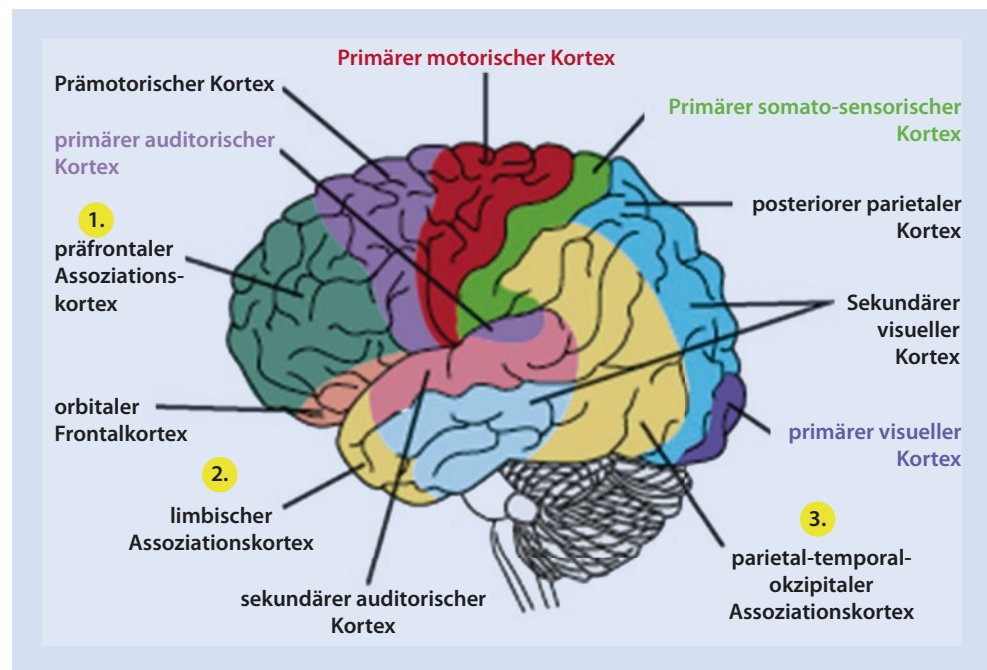
- **Neuronen** sind die zentralen signalverarbeitenden Zellen, die elektrische Signale, wie z. B. Aktionspotenziale, generieren und verarbeiten können.
- **Gliazellen** haben v. a. stützende und metabolische Funktionen. In den letzten Jahren zeigt sich jedoch immer mehr, dass sie zusätzlich Anteile an der Signalverarbeitung haben. Durch elektrische Kopplung der Zellen mit elektrischen Synapsen, (sog. „gap junctions“) können die Gliazellen ein elektrisches Hintergrundsyn-

► **Tab. 1.1** Funktionelle Areale des Kortex

Kortikale Areale	Funktion
Primär sensorische Areale	Sie erhalten z. B. Informationen von Augen, Ohren oder Haut und sind die erste kortikale Repräsentation des sensorischen Inputs
Primär motorische Areale	Von hier geht der Output für Körperbewegungen aus
Modalitätenspezifische Assoziationsareale	Sie repräsentieren einen höheren Level der Verarbeitung aus einem spezifischen sensorischen System
Multimodale Assoziationsareale	Hier wird der Input aus mehreren sensorischen Systemen koordiniert
Limbische kortikale Areale	Sie koordinieren sowohl Antrieb und Emotionen als auch viszerale Anteile, endokrine Balance und Immunregulation

1.2 · Was ist Neurofeedback?

■ **Abb. 1.9** Schematische Darstellung der funktionellen Areale des Kortex: Die gelb dargestellten Bereiche sind multimodale Assoziationsareale, die anderen sind primäre und sekundäre Areale für sensorischen Input. (Aus Schmidt und Lang 2007)



zytium im neuronalen System bilden, das die elektrische Signalverarbeitung zwischen den Neuronen signifikant beeinflusst. Außerdem sind Gliazellen dafür bekannt, dass sie relativ schnell große Mengen an Kalium-Ionen, die bei der Erregung von Nervenzellen in den Extrazellulärraum strömen, aufnehmen und puffern (► Abschn. 4.1.3). Dadurch kann z. B. der Gefahr einer Übererregung und folgendem Zelltod durch Exzitotoxizität entgegengewirkt werden, denn extrazellulär erhöhtes Kalium führt seinerseits wieder zur Depolarisation benachbarter Zellen (► Abschn. 1.2.3, „Kommunikation zwischen Nervenzellen“).

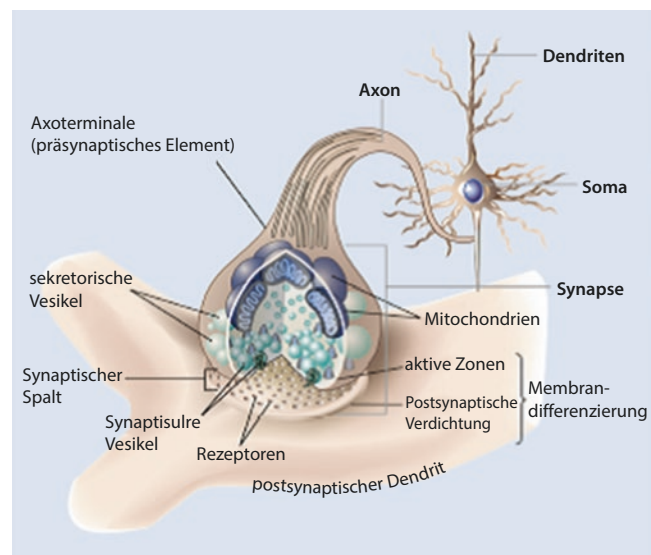
■ Nervenzellen

Es gibt verschieden Arten und Formen von Nervenzellen. Einfach gesagt, besteht eine **Nervenzelle** aus

- einem Zellkörper (Soma),
- einem Fortsatz, über den elektrische Impulse weitergeleitet werden (Axon), und
- vielen kleinen Verästelungen, die wie Antennen Informationen aus der Umgebung der Zelle aufnehmen könne (Dendriten) (■ Abb. 1.10).

Am Axon einer Zelle befindet sich am Ende ein Speicher für die chemischen Botenstoffe (terminaler Endknopf). Für die EEG-Messungen (► Abschn. 1.2.5) und das Neurofeedback sind, aufgrund ihrer Morphologie und ihrer Lage und Anordnung im Kortex, vor allem die Pyramidenzellen interessant.

Die Zellen liegen in den verschiedenen Schichten der Hirnrinde in unterschiedlicher Anzahl vor, dabei ziehen ihre Fortsätze (Axone) und die Dendriten durch die Schichten hindurch in andere Hirnregionen. Umgeben sind die Zellen von Flüssigkeit, die als Extrazellulärflüssigkeit bezeichnet wird, da sie sich außerhalb der Zelle befindet.

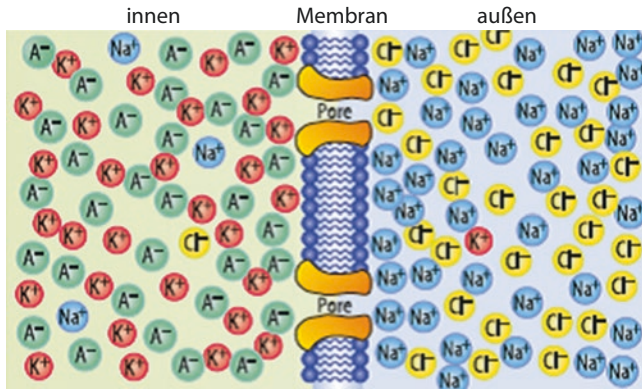


■ **Abb. 1.10** Schematische Darstellung einer Nervenzelle

■ Ruhepotenzial

Der Bereich außerhalb der Zelle wird als **Extrazellulärraum** bezeichnet, derjenige innerhalb der Zelle als **Intrazellulärraum**. In beiden Räumen befinden sich elektrisch geladene Teilchen, sowohl positiv geladene wie z. B. Natrium-Ionen als auch negativ geladene wie z. B. Chlorid-Ionen. Die Verteilung der Ionen ist in beiden Bereichen (Intra-/Extrazellulärraum) unterschiedlich, sodass sich aufgrund der unterschiedlichen positiven und negativen Ladungen eine elektrische Potentialdifferenz zwischen Innen- (negativer) und Außenbereich (positiver) ergibt (■ Abb. 1.11). Je nach Zelltyp beträgt diese Potentialdifferenz -50 bis -100 mV.

Dieser Zustand ist der Ruhezustand einer Nervenzelle und wird als **Ruhepotenzial** bezeichnet. Das Ruhepotenzial



■ **Abb. 1.11** Ionenverteilung an einer Nervenzelle: Auf beiden Seiten der Zellmembran sind inner- und außerhalb der Zelle unterschiedliche Ionen in unterschiedlich hohen Konzentrationen vertreten. A: negativ geladene Eiweißmoleküle im Zellinneren. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)

ist in erster Linie ein **Kaliumdiffusionspotenzial**, es ergibt sich aus dem Konzentrationsgefälle der Kalium-Ionen innen und außen und den im Ruhezustand offenen Ionenkanälen, die nur Kalium-Ionen durchlassen.

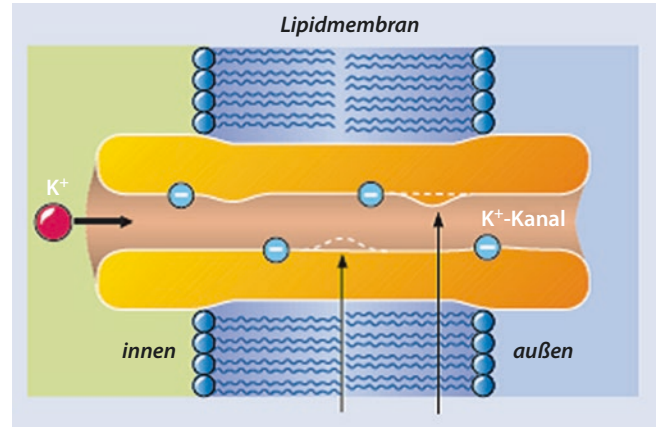
Damit eine Potenzialdifferenz aufrechterhalten werden kann, muss verhindert werden, dass sich die elektrisch geladenen Teilchen vermischen und dadurch ein Ladungsausgleich zwischen Extra- und Intrazellulärraum hergestellt wird. Dies wird durch die Zellmembran, die jede Zelle umgibt, verhindert (■ Abb. 1.11). Die Zellmembran besteht aus einer Lipiddoppelschicht. Darin integriert sind sog. **Ionenkanäle**, die immer nur bestimmte Ionen (elektrisch geladenen Teilchen) in einer bestimmten Menge in die Zelle hinein- oder aus der Zelle herauslassen (■ Abb. 1.12). Man unterscheidet

- transmitterabhängige Ionenkanäle, wie sie u. a. häufig an Synapsen vorkommen, und
- spannungsabhängige Ionenkanäle, wie z. B. die spannungsabhängigen Natriumkanäle, die essenziell für die Entstehung und Weiterleitung des Aktionspotenzials sind (► Abschn. 1.2.3, „Kommunikation zwischen Nervenzellen“).

Die **Offenwahrscheinlichkeit** von transmitterabhängigen Ionenkanälen korreliert mit der extrazellulären Transmitterkonzentration (z. B. im synaptischen Spalt), während die Offenwahrscheinlichkeit der spannungsabhängigen Ionenkanäle von den auftretenden Unterschieden in der elektrischen Spannung entlang der Membran abhängt. Erhöht sich z. B. die Offenwahrscheinlichkeit von Ionenkanälen, bedeutet das, dass die Ionen, für die der Kanal selektiv ist, in Richtung ihres Konzentrationsgradienten in die Zelle hinein- bzw. aus der Zelle herausdiffundieren (■ Abb. 1.13).

■ Signalweiterleitung innerhalb der Zelle

In bestimmten Bereichen der Zelle (v. a. im Axon) finden sich in der Zellmembran spannungsabhängige Natriumkanäle, die während des Ruhepotenzials (► Abschn. 1.2.3,



■ **Abb. 1.12** Schematische Darstellung eines Ionenkanals für Kalium-Ionen. Die Pfeile deuten an, wie sich die Zustände des Kanals ändern können. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)

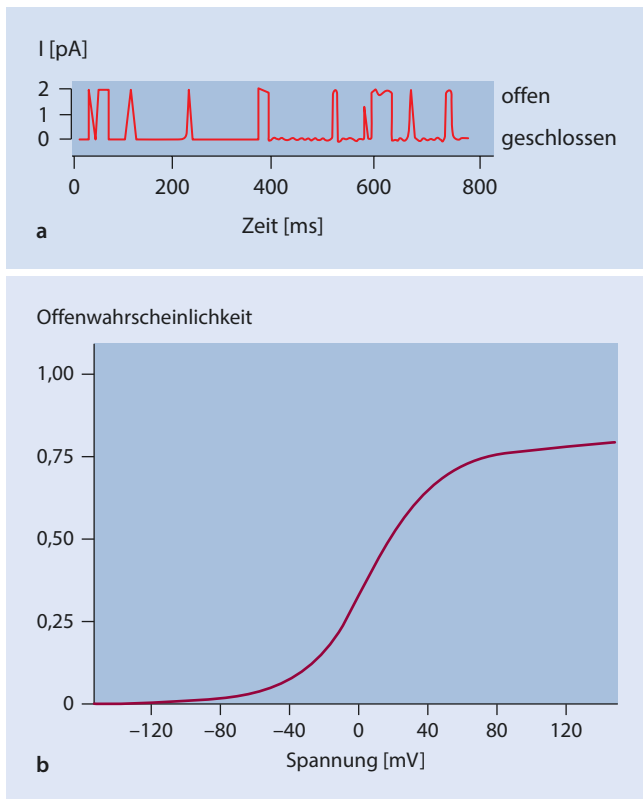
„Signalweiterleitung innerhalb der Zelle“) geschlossen sind. Diese Natriumkanäle können in **drei Zuständen** (geschlossen aktivierbar, offen aktiviert, geschlossen inaktivierbar) vorliegen, die sich je nach aktueller Spannung ändern (■ Abb. 1.14).

Diese Zustände lassen sich, wenn die Ionenkonzentrationen inner- und außerhalb der Zelle bekannt sind, mit der sog. **Goldmangleichung** berechnen. Es ist also nicht so, dass Kanäle entweder offen oder geschlossen sind, vielmehr wechseln sie ständig zwischen verschiedenen Zuständen hin und her. Deshalb spricht man auch nicht von offenen oder geschlossenen Kanälen, sondern von Änderungen der Offenwahrscheinlichkeiten.

Exkurse: Zustandsänderungen

Der ständige Wechsel von Zuständen ist übrigens nicht nur, wie hier für den Natriumkanal (► Abschn. 1.2.3, „Kommunikation zwischen Nervenzellen“) beschrieben, auf molekularer Ebene zutreffend, sondern auch für die Nervenzelle an sich, genauso wie für neuronale Netzwerke und das ganze Gehirn. Letztendlich werden mittels Neurofeedbacktraining Zustandsänderungen von Netzwerkaktivitäten bewirkt, die ihrerseits natürlich wieder durch Zustandsänderungen von Zellen und Molekülen (wie z. B. Ionenkanälen) zustande kommen. Dabei geht es immer um das fein abgestimmte Gleichgewicht zwischen Erregung und Hemmung von Erregung.

Aktionspotenzial Die Natriumkanäle wechseln ihren Zustand von aktivierbar geschlossen in offen aktiviert, wenn die Zelle an der entsprechenden Stelle ausreichend depolarisiert, d. h. innen positiver wird. Wird durch die Depolarisation ein Schwellenwert von -55 mV erreicht, wird ein **Aktionspotenzial** ausgelöst (■ Abb. 1.15). Das geschieht am Axonhügel, am Übergang vom Nervenzellsoma zum Axon. Einmal ausgelöst, breitet sich das Aktionspotenzial durch weitere Depolarisierung der angrenzenden Membranbereiche entlang des Axons aus. Handelt es sich um myelinisierte Axone,



■ **Abb. 1.13** a, b Elektrophysiologische Parameter eines Ionenkanals. a Beispiel für das Hin- und Herschalten von einem Ionenkanal und dem Strom, der im offenen Zustand fließt. b Beispiel für die Änderung der Offenwahrscheinlichkeit eines Ionenkanals in Abhängigkeit von der angelegten Spannung (spannungsabhängiger Ionenkanal). (Aus Schmidt und Lang 2007)

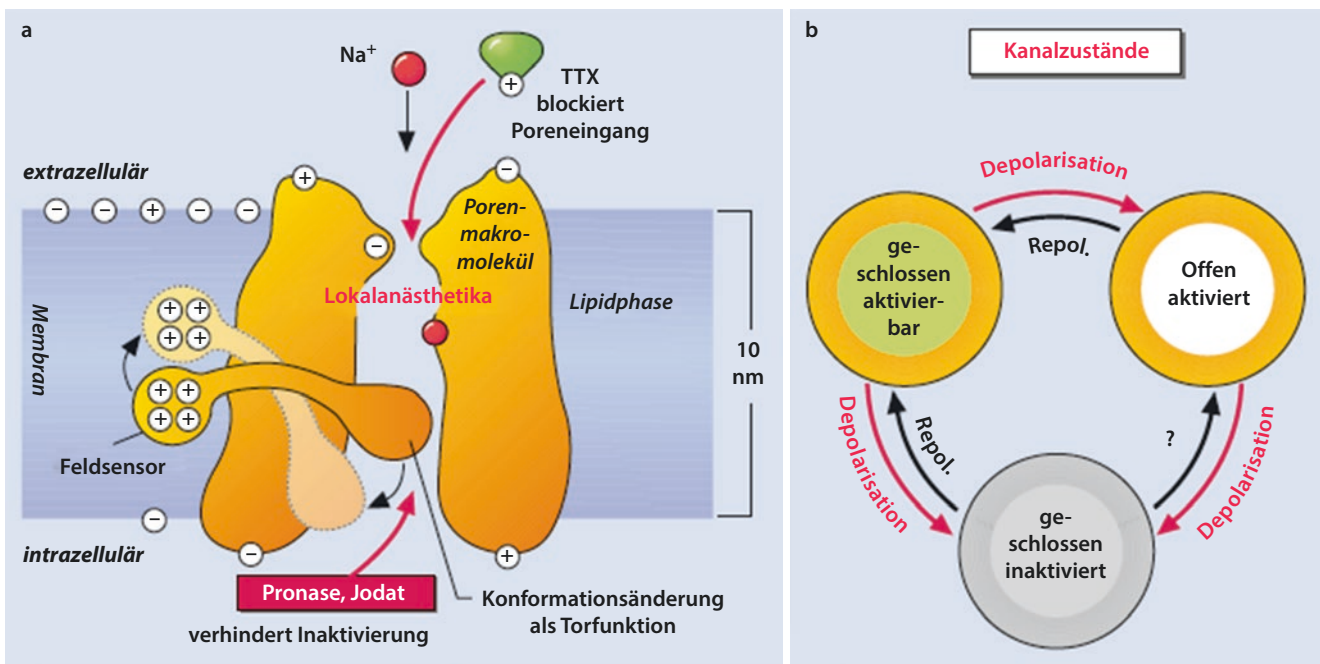
die abschnittsweise mit Gliazellen isoliert sind, dann erfolgt die Weiterleitung des Aktionspotenzials **saltatorisch**, d. h., die Erregung „springt“ über die isolierten Abschnitte hinweg zum nächsten unmyelinisierten Membranabschnitt, der sich durch eine hohe Dichte von spannungsabhängigen Natriumkanälen auszeichnet. Die Ausbreitung des Aktionspotenzials wurde bereits 1952 von Hodgkin und Huxley mathematisch beschrieben. Die Gleichungen enthalten alle Parameter, die zur Beschreibung des Aktionspotenzials nötig sind. Sie gelten darüber hinaus generell für die Beschreibung von Oszillationen und Wellenausbreitung in erregbaren Medien.

Nach Ende des Aktionspotenzials muss die ursprüngliche Ionenverteilung (Ruhepotential) wiederhergestellt werden. Denn während des Aktionspotenzials kommt es durch die Zustandsänderung der Na-Kanäle zunächst zu einem Einstrom von Natrium-Ionen in die Zelle, danach zu einem Ausstrom von Kalium-Ionen aus der Zelle. Danach ist zwar mehr oder weniger der elektrische Gradient wiederhergestellt, allerdings noch nicht der chemische Gradient. Das heißt, nach jedem Aktionspotenzial muss unter relativ hohem Energieaufwand mit der sog. **Natrium-Kalium-Pumpe** wieder Kalium in die Zelle hinein- und Natrium aus der Zelle herausgepumpt werden, um den ursprünglichen elektrochemischen Gradienten wiederherzustellen.

■ Kommunikation zwischen Nervenzellen

In neuronalen Netzwerken kommunizieren Nervenzellen entweder über elektrische oder chemische **Synapsen** miteinander:

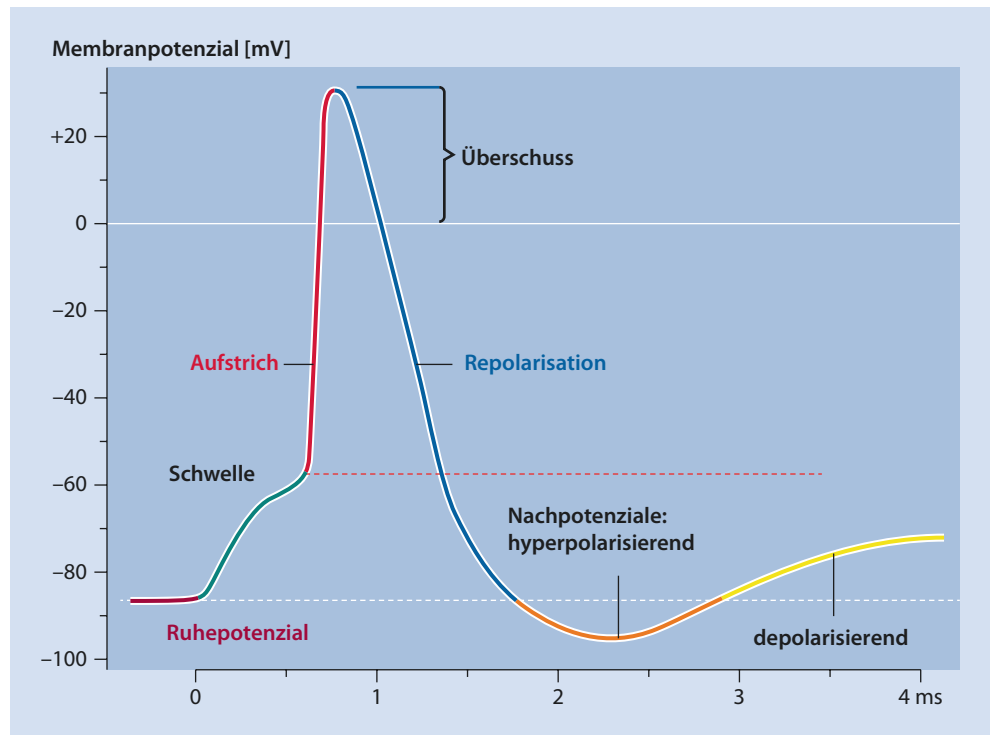
- **Elektrische Synapsen** sind mit Flüssigkeit gefüllte Poren, die sich durch die Membranen zweier aneinanderliegen-



■ **Abb. 1.14** a, b Funktionsweise und Zustände des spannungsabhängigen Natriumkanals. a Der Kanal besitzt einen Feldsensor, um auf Spannungsänderungen zu reagieren. Er lässt sich durch Tetrodotoxin

(TTX) von außen hemmen. Pronase und Jodat können die Inaktivierung hemmen. b Zustände des Kanals. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)

■ **Abb. 1.15** Änderung des Membranpotenzials während der Phasen eines Aktionspotenzials. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)



der Zellen ziehen. Sie koppeln die Zellen elektrisch und erlauben darüber hinaus auch den Austausch kleinerer Moleküle. Die Kommunikation kann in beide Richtungen stattfinden und ist sehr schnell.

– **Chemische Synapsen** funktionieren, indem sie chemische Botenstoffe austauschen (sog. Neurotransmitter), die dazu führen, dass sich an den nachfolgenden Zellen elektrische Potenziale verändern. Die Signalweiterleitung an chemischen Synapsen funktioniert nur in eine Richtung. Die präsynaptische Zelle entlässt ihre Botenstoffe (Neurotransmitter) in den synaptischen Spalt. Auslöser für die Ausschüttung der Transmitter ist die Information, die über die Aktionspotenziale an das synaptische Endköpfchen weitergeleitet und dort wiederum zur graduieren Depolarisierung der Membran führt. Die ausgeschütteten Transmitter diffundieren durch den synaptischen Spalt und interagieren an der Postsynapse der nachfolgenden Zellmembran mit Rezeptoren, die für den jeweiligen Transmitter spezifisch sind. Die Rezeptoren sind meist **transmittergesteuerte Ionenkanäle** (► Abschn. 1.2.3, „Signalweiterleitung innerhalb der Zelle“), die durch die Interaktion mit dem Neurotransmitter ihre Offenwahrscheinlichkeit ändern, wodurch sich die Durchlässigkeit der Membran für spezifische Ionen ändert. Als Folge des geänderten Ionenflusses ändert sich dann das elektrische Potenzial der nachfolgenden Zelle (■ Abb. 1.16).

Einfach gesagt, existieren **zwei Arten von Neuronen**, die Transmitter ausschütten: **exzitatorische** Neuronen (mit erregenden Transmittern wie z. B. Glutamat) und **inhibitorische Neuronen** (mit hemmenden Transmittern wie z. B. GABA [Gamma-Amino-Buttersäure]) (■ Abb. 1.17):

– Exzitatorische Transmitter führen an der nachfolgenden Zelle zur einer **Depolarisation**, also zu einer Positivierung des Zellinneren, z. B. durch den Einstrom positiver Natrium-Ionen.

– Inhibitorische Transmitter führen an der postsynaptischen Zelle zu einer **Hyperpolarisation**, also zu einer Negativierung des Zellinneren, z. B. durch Chlorid-Ionen.

So erhält jede Nervenzelle hauptsächlich über ihre Dendriten sowohl exzitatorischen als auch inhibitorischen Input. Dieser Input wird sowohl **räumlich** als auch **zeitlich summiert**, und die Summe aller Inputs entscheidet letztendlich, wann und wie viele Aktionspotenziale eine Nervenzelle generiert.

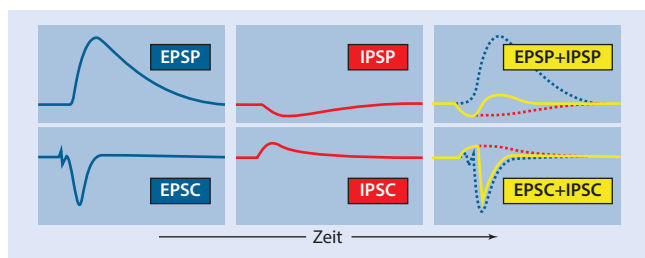
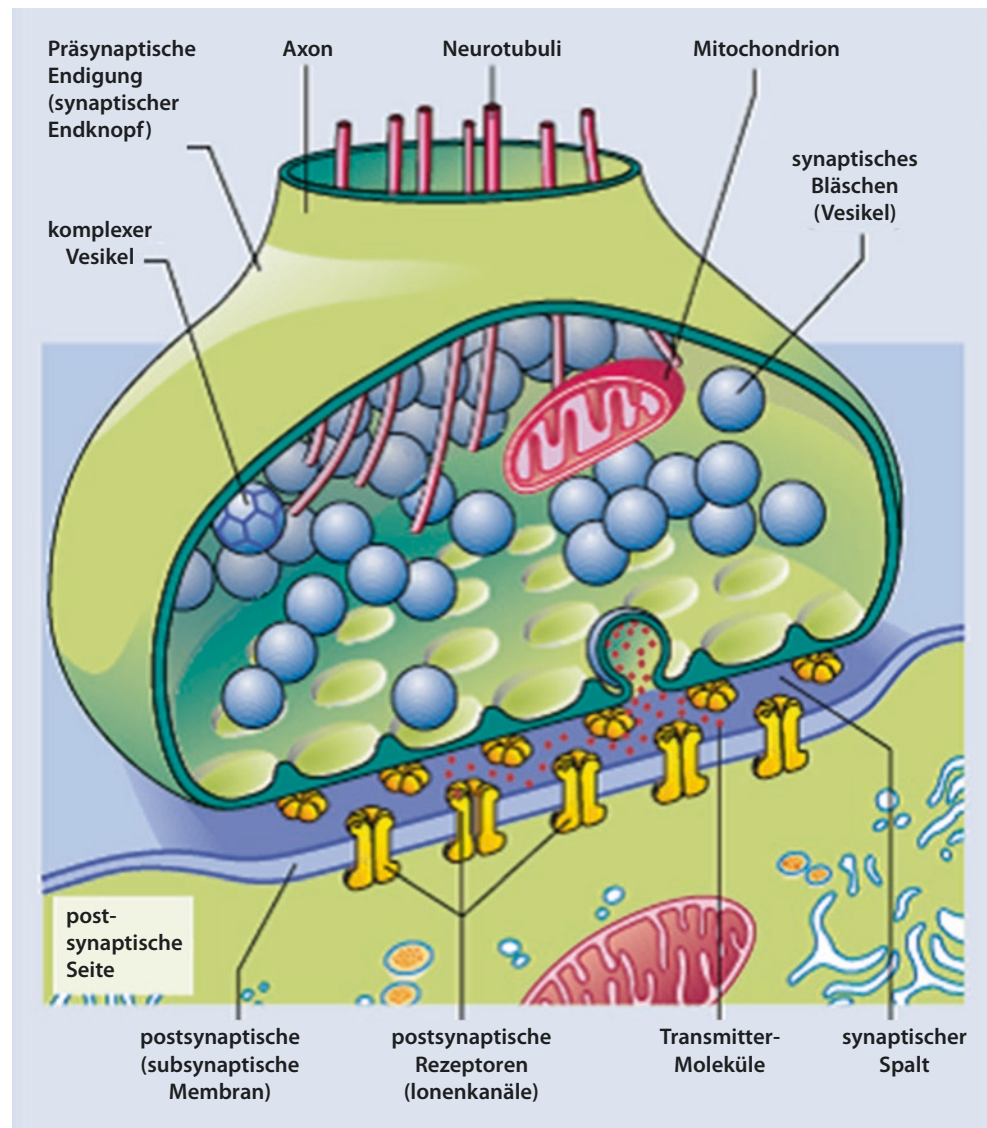
Durch die vielfältigen Verknüpfungen inhibitorischer und exzitatorischer Synapsen entstehen **komplexe Netzwerke** mit positiven und negativen Feedbacksystemen.

Netzwerke

Das Gehirn ist ein **komplexes Netzwerk** aus Neuronen, die, wie oben beschrieben, miteinander kommunizieren.

Das Wissen über die zellulären Vorgänge allein ist nicht ausreichend, um die Funktion der Gehirnaktivität zu verstehen. Vielmehr sollten wir verstehen, wie die Nervenzellen untereinander verknüpft sind, und wie sie miteinander interagieren. Das Gehirn muss auf verschiedenen Funktionsebenen (von der Zelle bis zum Netzwerk) verstanden werden. Im Gehirn arbeiten Milliarden von Nervenzellen in komplexen Netzwerken, die miteinander in Wechselwirkung stehen. In den letzten Jahren sind Netzwerke vor allem für die Erforschung **komplexer biologischer Systeme** in das Zentrum des wissenschaftlichen Interesses gerückt. Die Betrachtung des Gehirns als Netzwerk erbrachte in den letzten Jahren viele neue Erkenntnisse über die Architektur und Funktionsweise des Gehirns, vor allem auch darüber, wie bestimmte Gehirnbereiche miteinander verknüpft sind. Eines der größten aktuellen Forschungsprojekte in diesem Bereich ist sicher das **Human Connectome Project**.

■ **Abb. 1.16** Schematische Darstellung einer chemischen Synapse mit synaptischem Endköpfchen und postsynaptischer Membran. (Aus Birbaumer und Schmid 2006)



■ **Abb. 1.17** Summation (gelb) von erregenden (blau) und hemmenden (rot) Input an der postsynaptischen Membran. EPSP: exzitatorisches postsynaptisches Potenzial, IPSP: inhibitorisches postsynaptisches Potenzial. (Aus Schmidt und Lang 2007)

Ein **Konnektom** ist die komplette Beschreibung aller strukturellen Verbindungen eines Nervensystems. Eine solche Beschreibung ergibt sozusagen einen Schaltplan für das ganze Gehirn, um herauszufinden, wie welche Neurone miteinander verbunden sind. Die Konnektomforschung konzentriert sich auf die Netzwerkeigenschaften des Gehirns.

Seither ist die vollständige Rekonstruktion eines Konnektoms auf Mikroebene nur für den Fadenwurm **C. elegans** gelungen. Sein Nervensystem besitzt gerade mal um die **300 Neuronen**. Trotzdem brauchte es in den 70er-Jahren 14 Jahre, bis von dem Wurmgehirn ein vollständiger Schaltplan erstellt werden konnte. Im Vergleich dazu besitzt das **menschliche Gehirn 100 Milliarden Nervenzellen** mit noch tausendmal mehr Verknüpfungen. Das lässt den Ehrgeiz des Human Connectome Projects erahnen. Seit den 70er-Jahren haben sich sowohl die Technik der bildgebenden Verfahren als auch die Technik der Ultradünnschnitte von Nervengewebe und vor allem die Verarbeitung der dadurch entstehenden Bilder extrem weiterentwickelt. Trotz allem braucht es für solch ein Projekt neben sehr leistungsstarken Rechnern eine interdisziplinäre Forschungsarbeit, wie wir sie in der Computational Neuroscience finden.

Computational Neuroscience ist noch eine recht junge Forschungsdisziplin, die versucht, Experiment und Theorie zu verbinden. In interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Biologen, Medizinern, Physikern, Mathematikern, Program-