

Inhalt

Vorwort	5
A Nervensystem	7
1. Einführung	7
2. Bau der Nervenzelle	8
2.1 Der Grundbauplan der Nervenzelle	10
2.2 Verschiedene Nervenzelltypen	10
3. Funktion der Nervenzelle	12
3.1 Die unerregte Nervenzelle	13
3.2 Die erregte Nervenzelle	19
3.2.1 Bildung des Aktionspotenzials	19
3.2.2 Erregungsleitung	24
4. Zusammenfassung: Bau und Funktion der Nervenzelle	26
5. Synaptische Erregungsübertragung	28
5.1 Prinzip der chemischen synaptischen Übertragung	29
5.2 Arbeitsweise zentraler Synapsen	30
5.2.1 Zentrale erregende (excitatorische) Synapsen	31
5.2.2 Zentrale hemmende (inhibitorische) Synapsen	32
5.2.3 Zusammenspiel der Synapsen	33
5.3 Übertragung an der neuromuskulären Synapse	34
5.4 Langsame Synapsen	39
5.5 Beeinflussung der synaptischen Erregungsübertragung	39
5.6 Zusammenfassung: Synaptische Erregungsübertragung	42
6. Nervenzellverbände	44
6.1 Nervensysteme von Wirbellosen	44
6.2 Nervensysteme der Wirbeltiere und des Menschen	46
6.2.1 Zentralnervensystem (ZNS)	47
6.2.2 Peripheres Nervensystem	50
7. Physiologie kleiner Neuronenverbände	52
7.1 Reflexbogen	52
7.2 Hemmschaltung für den Gegenspieler	54
8. Vegetatives Nervensystem	56
8.1 Aufbau des vegetativen Nervensystems	57
8.2 Wirkungen des vegetativen Nervensystems	57
9. Zusammenfassung: Nervensystem	59
B Sinne	61
1. Überblick über die verschiedenen Rezeptortypen	61
2. Der Lichtsinn	65
2.1 Die Entwicklung verschiedener Augentypen	65
2.2 Das menschliche Auge	67
2.2.1 Bau des menschlichen Auges	67
2.2.2 Vorgänge in den Photorezeptoren	70
2.2.3 Leistungen des Auges	74
2.3 Das Prinzip der lateralen Hemmung	78
3. Der Gehörsinn	81
4. Besondere Leistungen von Sinnesorganen	85
5. Zusammenfassung: Sinne	86

C	Hormone	88
1.	Einführung	88
2.	Hormone als Botenstoffe	90
2.1	Funktion der Hormone	90
2.2	Herkunft und Leistungen der Hormone	90
2.3	Einteilung der Hormone	91
2.4	Herstellung von Hormonen	91
2.4.1	Die Synthese von Peptid- und Protein hormones	91
2.4.2	Die Synthese von Steroidhormonen	94
2.4.3	Die Synthese von Adrenalin und Thyroxin	96
2.4.4	Die Synthese der Prostaglandine	97
2.5	Wirkungsmechanismen der Hormone	98
2.5.1	Die Wirkungsweise der Steroidhormone	99
2.5.2	Die Wirkungsweise der Schilddrüsenhormone	100
2.5.3	Die Wirkungsweise der Peptid- und Protein hormones sowie von Adrenalin	100
2.6	Die Inaktivierung der Hormone	103
2.7	Zusammenfassung: Hormone und ihre Funktion	103
3.	Hormonelle Regulationsmechanismen	104
3.1	Grundbegriffe der Regeltechnik	105
3.2	Physiologische Regelkreise	108
3.3	Prinzipien der hormonellen Regulation	110
3.4	Die Regulation des Blutzuckerspiegels	113
3.5	Fehlregulation am Beispiel der Zuckerkrankheit	117
3.5.1	Der Typ-I-Diabetes	117
3.5.2	Der Typ-II-Diabetes	117
3.6	Zusammenfassung: Hormone	121
D	Gehirn und Verhalten	123
1.	Einführung	123
2.	Gehirn und Wahrnehmung	124
3.	Bewegungssteuerung durch das Gehirn	128
4.	Verhaltensbewertung durch das Gehirn	131
4.1	Gehirn und Gedächtnis	131
4.2	Gehirn und Gefühle	135
5.	Steuerung und Regelung der Verhaltensmotivation	138
5.1	Das biologische Motivationsmodell	138
5.2	Die Regulation der Nahrungsaufnahme	138
5.2.1	Wie entsteht Hunger?	138
5.2.2	Wie entsteht Sättigung?	141
5.3	Die Steuerung des Kampf- und Fluchtverhaltens	143
5.3.1	Vorgänge im zentralen Nervensystem	146
5.3.2	Vorgänge im vegetativen Nervensystem	147
5.3.3	Vorgänge im Hormonsystem	148
5.4	Biologische Steuerung des Suchtverhaltens	149
5.5	Zusammenfassung: Gehirn und Verhalten	155
	Quellen- und Literaturverzeichnis	158
	Lösungsteil	161
	Glossar	170
	Register	172

4. Verhaltensbewertung durch das Gehirn

Bei allem, was wir tun, **bewertet** unser Gehirn, ob es für uns gut oder schlecht war, ob es uns Lust bereitete oder nicht und ob es unseren Erwartungen entsprach. Das Ergebnis dieser Bewertung wird in unserem **Gedächtnis** gespeichert. Es drückt sich allerdings meist nicht in logischen Schlussfolgerungen, sondern in **Gefühlen** aus: Wir tun

etwas „gern“, weil es uns „Spaß macht“, oder vermeiden etwas, weil wir dagegen eine Abneigung empfinden.

Erinnerungen und Gefühle sind an all unseren Verhaltensentscheidungen beteiligt. Wir wollen deshalb auch diese beiden Gehirnleistungen kurz behandeln.

4.1 Gehirn und Gedächtnis

Definition

Gedächtnis ist die Fähigkeit des Gehirns, Erfahrungen zu **speichern** und die **Erinnerung** daran zu ermöglichen, d. h., Gespeichertes wieder abrufen zu können.

Unter dem Gesichtspunkt der **Informationsverarbeitung** funktioniert das Gehirn ähnlich wie ein Computer. Es muss drei wesentliche Operationen durchführen:

1. Die eintreffenden sensorischen Reize müssen in neuronale Signale übersetzt werden, die das Gehirn verarbeiten kann (**Kodierung**, vgl. Kap. D.2).
2. Ein Teil des kodierten Materials wird über die Zeit aufbewahrt (**Speicherung**).
3. Die gespeicherten Informationen werden zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgefunden (**Abruf**).

Was das Gehirn vom Computer wesentlich unterscheidet, ist die **Stabilität** von Erinnerungen. Die Billionen von Synapsen in unserem Gehirn erlauben zwar eine sehr viel **komplexere** Informationsverarbeitung, aber es kommt dadurch zu **spontanen Veränderungen** der Gedächtnisinhalte. Unser Gedächtnis arbeitet nicht wie ein Fotoalbum oder ein Film, in dem die Ereignisse in exakten Kopien festgehalten sind. Woran wir uns

erinnern, wird durch viele Faktoren beeinflusst und modifiziert:

- Wir speichern nur einen **geringen Teil** der von uns aufgenommenen Informationen (nach Schätzungen nur etwa 1 Prozent!).
- Einen Großteil der einmal gespeicherten Information **vergessen** wir wieder. Das ist zwar einerseits lästig (besonders für Lernende), andererseits schützt es uns vor einer Überflutung mit Daten.
- Wir speichern meistens keine Einzelheiten, sondern **Konzepte**. Beim Lesen dieses Buches werden nicht die wörtlichen Formulierungen der einzelnen Sätze behalten (bis auf die Merksätze natürlich), sondern die faktischen Zusammenhänge. Bei einer Überprüfung unseres Wissens erinnern wir uns an das Konzept und die Sprachmechanismen liefern uns die notwendigen verbalen Begriffe dazu.
- Wir können neue Daten leichter behalten, wenn sie unter Nutzung bereits gespeicherter Informationen aufbewahrt wer-

Gehirn und Verhalten

den. Eine neue Information über die synaptische Signalübertragung wird viel leichter behalten, wenn ich schon etwas über Synapsen weiß, als wenn ich zum ersten Mal etwas davon lese oder höre.

- Eine Information wird umso wahrscheinlicher behalten, je öfter sie wiederholt oder „geübt“ wird.

Diese und andere Befunde legen nahe, dass es in unserem Gehirn mindestens **drei Gedächtnissysteme** gibt (vgl. Abb. 117): ein Ultrakurzzeitgedächtnis (auch sensorisches Gedächtnis genannt), ein Kurzzeitgedächtnis und ein Langzeitgedächtnis.

- ① Durch das **sensorische Gedächtnis** werden Sinneseindrücke für 1 bis 2 Sekunden sehr **exakt** festgehalten (daher auch die Bezeichnung Ultrakurzzeitgedächtnis). Ohne diesen Speicher würden wir Reize nur so lange „sehen“ oder „hören“, wie sie physikalisch vorhanden wären – nicht lange genug, um sie zu erkennen und zur weiteren Verarbeitung leiten zu können.
- ② Ins **Kurzzeitgedächtnis** gelangen nur solche Sinneseindrücke aus dem sensorischen Gedächtnis, denen wir genügend **Aufmerksamkeit** schenken. Durch diesen Selektionsvorgang werden diejenigen Reize herausgefiltert, auf die wir uns kon-

zentrieren wollen (z. B. auf einer lauten Party einem Gesprächspartner zuhören) oder sollen (z. B. in einer Gefahrensituation). Allerdings ist auch hier die **Speicherdauer** sehr kurz: Sie beträgt für eine Informationseinheit nur 20 Sekunden. Auch die **Speicherkapazität** ist sehr begrenzt: Wir können nicht mehr als ungefähr 7 Einzelelemente festhalten.

Das Kurzzeitgedächtnis ist das **einzige** Gedächtnissystem, in dem Material **bewusst verarbeitet** wird. In diesem Fall hält sich das Material weitaus länger als 20 Sekunden – eben so lange, wie es mit bewusster Aufmerksamkeit bedacht wird. Auch Material aus dem Langzeitgedächtnis kann nur im Kurzzeitgedächtnis neu bearbeitet werden. Deshalb wird es auch als **Arbeitsgedächtnis** bezeichnet.

- ③ Das **Langzeitgedächtnis** ist der Großspeicher für alle Erfahrungen, Informationen, Fertigkeiten, Regeln, Urteile, Wörter, Kategorien – kurz für das, was wir über uns und die Welt wissen.

Während im Kurzzeitgedächtnis Informationen **sequenziell**, d. h. in der zeitlichen Abfolge ihres Eintreffens, gespeichert werden, organisiert das Langzeitgedächtnis Erinnerungen nach ihrer **Bedeutung**. Neue Informationen können so in einen **Kontext*** eingeordnet werden.

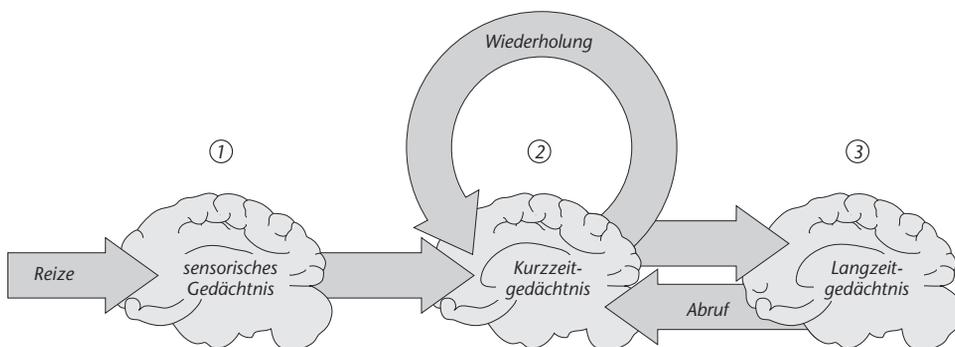


Abb. 117
Schematische Darstellung der Organisation des Gedächtnisses beim Menschen

Aufgabe

Do1 Lesen Sie die folgende Liste von Zufallszahlen **einmal** durch, decken Sie sie dann zu und schreiben Sie davon so viele wie möglich in der Reihenfolge auf, in der sie hier erscheinen.

8 1 7 3 6 4 9 4 2 8 5 Lösung: _____

Lesen Sie die Liste zufällig ausgewählter Buchstaben **einmal** durch und wiederholen Sie den Gedächtnistest.

J M R S O F L P T Z B Lösung: _____

Im Langzeitgedächtnis werden nicht nur sensorische Informationen von außen gespeichert, sondern auch intern im Gehirn entstehendes Material, wie kreative Gedanken, Meinungen, Wünsche. Je nach Informationstyp unterscheidet man verschiedene **Arten** von Gedächtnis:

Im **prozeduralen*** Gedächtnis sind **Fertigkeiten** gespeichert, wie Fahrrad fahren oder mit Messer und Gabel essen. Wir erinnern uns ihrer meist unbewusst.

Im **deklarativen** Gedächtnis sind **Fakten** über alles Mögliche gespeichert, z. B. wie man eine echte „Sauce hollandaise“ zubereitet. Zum deklarativen Gedächtnis gehören vor allem:

- das **semantische*** Gedächtnis; hier sind die **Bedeutungen** von Wörtern und Begriffen gespeichert – eine Art Wörterbuch im Kopf,
- das **episodische** Gedächtnis; hier sind Erinnerungen an **persönliche Ereignisse** gespeichert – sozusagen eine Autobiographie.

Aufgabe

Do2 Ein vierundvierzigjähriger ehemaliger Industriemanager hatte bei einem Reitunfall Verletzungen im Bereich beider Schläfenlappen erlitten. In der Folge konnte er weder Verwandte wieder erkennen noch erinnerte er sich an seine frühere berufliche Tätigkeit. Sein Schulwissen war ihm allerdings erhalten geblieben und er beherrschte auch noch viele Fertigkeiten und Bewegungsabläufe (z. B. konnte er Auto fahren). Er erinnerte sich, dass der Kilimandscharo in Tansania liegt, aber nicht daran, dass er ihn bestiegen hatte. Er wusste nicht mehr, dass er sehr gut Italienisch sprach, befolgte aber zu seiner eigenen Überraschung italienische Anweisungen.

- a) Erläutern Sie, welche Gedächtnisarten es gibt.
- b) Erörtern Sie, welche Art von Gedächtnisverlust der Patient erlitten hat.

Wie ist das Gedächtnis konstruiert?

Diese Frage beschäftigt die Forschung schon lange und sie ist noch immer nicht befriedigend geklärt. Einige Tatsachen sind jedoch bekannt.

Unser Kurzzeitgedächtnis funktioniert auf der Basis **neuronaler Schaltkreise** mit **positiver Rückkoppelung**:

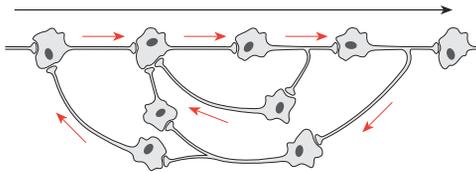


Abb. 118
Schematische Darstellung eines neuronalen Schaltkreises mit positiver Rückkoppelung

In einer solchen Schaltung wird eine einmal ausgelöste, im Beispiel von links kommende Erregung für längere Zeit kreisen, da es durch die erregenden, rückläufigen Axonverzweigungen immer wieder zu einer erneuten Aktivierung der Nervenzellen kommt. An seinem rechten Ausgang gibt der Schaltkreis das kreisende Erregungsmuster ab (ggf. zur Speicherung im Langzeitgedächtnis). Erfolgt die Rückkoppelung nicht hundertprozentig, wird das Kreisen der Erregung langsam schwächer und klingt schließlich völlig ab.

Für das Langzeitgedächtnis reichen solche Schaltkreise allein nicht aus. Die dauerhafte Speicherung wird durch Veränderungen an den beteiligten **Synapsen** bewirkt. An Synapsen im **Hippocampus** – einer Gehirnregion, die für die Übertragung von Informationen

ins Langzeitgedächtnis zuständig ist – wurde ein Mechanismus entdeckt, der als **Langzeitpotenzierung** bezeichnet wird (vgl. Abb. 119).

Eine solche Synapse arbeitet mit Glutaminsäure als Transmitter. Im Unterschied zu „normalen“ Synapsen sitzen in der postsynaptischen Membran **zwei verschiedene Rezeptoren** für Glutaminsäure. Wie arbeitet diese Synapse?

- ① Ankommende Aktionspotenziale öffnen Calciumkanäle, durch die Calcium in die präsynaptische Endigung einströmt. Das hat die Freisetzung von Glutaminsäure aus synaptischen Vesikeln zur Folge.
- ② Glutaminsäure bindet an beide Rezeptortypen. Zuerst reagiert aber nur der eine Rezeptortyp, der Natriumkanäle öffnet. Dadurch kommt es zu einer Depolarisierung der postsynaptischen Membran.
- ③ Durch diese Depolarisierung wird auch der zweite Rezeptortyp aktiviert, indem er Magnesiumionen, die die Blockierung bewirkt hatten, aus den Ionenkanälen freisetzt. Jetzt können Calciumionen in die Zelle einströmen.
- ④ Diese Calciumionen aktivieren verschiedene **Proteinkinasen**, die die Langzeitpotenzierung einleiten.
- ⑤ Die postsynaptische Zelle setzt daraufhin einen Botenstoff (Stickstoffmonoxid) frei, der durch die Zellmembran zur präsynaptischen Endigung diffundiert.
- ⑥ In der präsynaptischen Endigung bewirkt der Botenstoff, dass die Freisetzung von Glutaminsäure **gesteigert** wird. Dadurch bleibt die Langzeitpotenzierung erhalten.

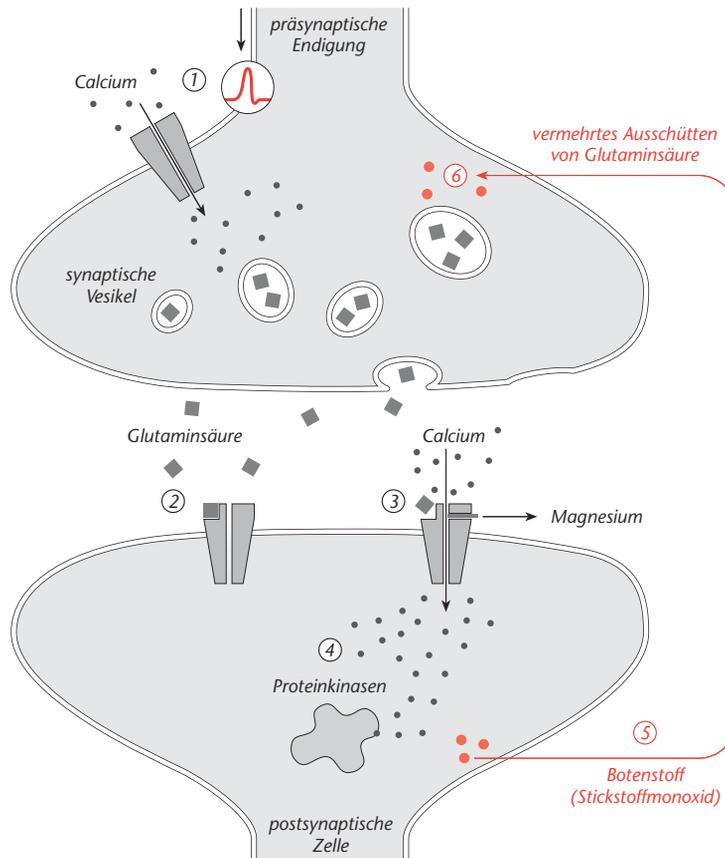


Abb. 119
Schematische Darstellung einer Synapse mit Langzeitpotenzierung, Erläuterungen im Text

4.2 Gehirn und Gefühle

Gefühle oder **Emotionen*** stellen einen wichtigen – und oft auch dramatischen – Aspekt tierischen und menschlichen Verhaltens dar. Wir wissen alle aus eigener Erfahrung, wie stark Emotionen unser Erleben bestimmen können, von riesiger Freude über lähmende Furcht bis zu schäumender Wut.

In Emotionen drückt sich eine angeborene oder erworbene **Bewertung** von Verhaltenssituationen aus. Es handelt sich demnach um einen Vermittlungsmechanismus, der eine **optimale Verhaltensreaktion** des Organismus auf ein für seine Bedürfnisse und Zielsetzungen bedeutsames Ereignis gewährleistet.

Definition

Emotionen sind komplexe Muster von Veränderungen in einem Organismus, die als **Reaktion auf Situationen** auftreten, welche für ein Individuum bedeutsam sind, und die Gefühle (z. B. Angst), physiologische Erregung (z. B. Herzklopfen), Denkprozesse (z. B. Situationsbewertung) und Ausdruck (z. B. Weinen) einschließen.

Gehirn und Verhalten

Emotionen **steigern** – so paradox es auch scheinen mag – die **Flexibilität** des Verhaltens: Wir sind nicht gezwungen, auf einen äußeren Reiz instinktiv zu reagieren, sondern haben die Möglichkeit, ihn im Hinblick auf unsere Bedürfnisse, Wünsche und Erwartungen zu **bewerten** und unsere Reaktion darauf abzustimmen.

Die **Bewertung** erfolgt nach der Theorie von LAZARUS in einem zweistufigen Prozess:

- Bei der **ersten Einschätzung** wird geprüft, ob ein Ereignis für den Organismus angenehm, unangenehm oder unwichtig ist: Finde ich es nett, dass der Nachbar seine Musik so laut hört, stört es mich oder ist es mir egal?
- Bei der **zweiten Einschätzung** wird geprüft, welche Ressourcen dem Organismus zur Bewältigung des Ereignisses zur Verfügung stehen: Wenn es mich stört, was kann ich dagegen tun? Soll ich hingehen und mich beschweren? Was ist, wenn er nicht aufmacht? Soll ich den Hausmeister einschalten? Vielleicht merkt er ja gar nicht, wie laut es ist? Na ja, so laut ist es nun auch wieder nicht! Aber unverschämt ist es schon ...

Die Bewertung führt zur Aktivierung einer entsprechenden **Handlungsbereitschaft**, z. B. zum Nachbarn zu gehen und ihm „die Meinung zu sagen“. Die aktivierte Handlungsbereitschaft ist eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung des entsprechenden Bewegungsprogramms (vgl. Kap. D.3).

Emotionen bereiten den Organismus auf die anstehende Verhaltensreaktion auch **physiologisch** vor. Es kommt darauf an, die Energien für die mit der Verhaltensreaktion verbundenen Belastungen bereitzustellen. (*Wie das genau funktioniert, erläutern wir in Abschnitt D.5.3.*)

Insbesondere bei uns Menschen führen solche Zustände zu **Gefühlen** – innerlich erlebten Eindrücken, die wir mit Worten wie „ärgerlich“, „traurig“ oder „wütend“ umschreiben. Es scheint sich um **angeborene** Erlebniskategorien zu handeln, denn Menschen aus den unterschiedlichsten Kulturen zeigen die gleichen emotionalen Gesichtsausdrücke.

Obwohl wir den Eindruck haben, dass Gefühle „aus dem Bauch“ oder „von Herzen“ kommen, versetzt uns das **Gehirn** in die Lage,

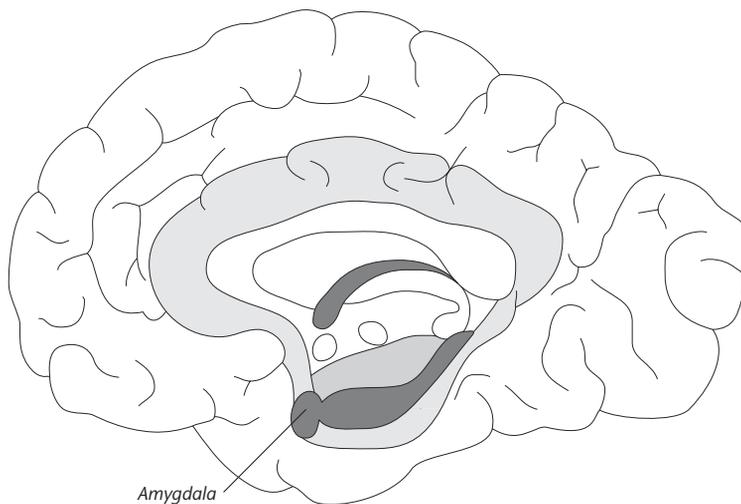


Abb. 120
Lage der Gehirnbereiche des limbischen Systems

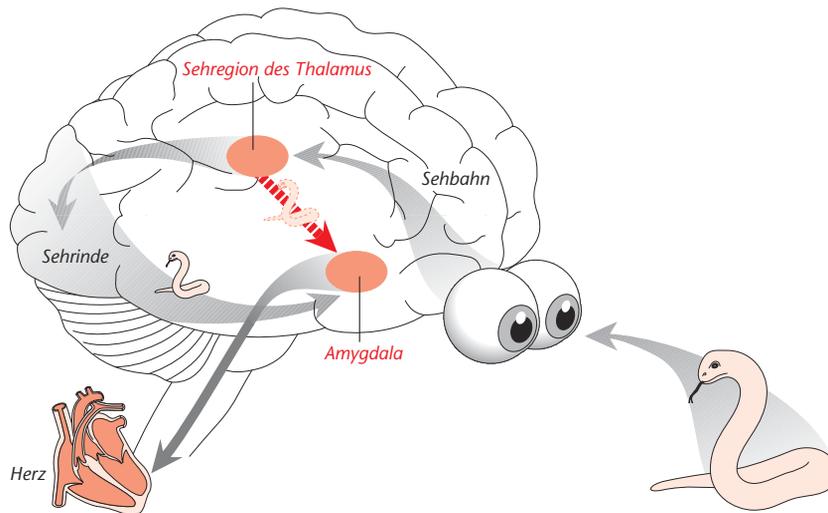


Abb. 121
Schema der Reizverarbeitung beim Erschrecken vor einer Schlange

emotional zu reagieren: Mit der Entwicklung der Säugetiere entstanden aus dem „Riechhirn“ die Bereiche, die für die Regulierung der Emotionen zuständig sind. Diesen Teil des Gehirns nennt man das **limbische System**; es umgibt den oberen Teil des Gehirns wie ein Ring (vgl. Abb. 120). Von hier aus nehmen die Gefühle Einfluss sowohl auf unser Verhalten als auch auf die körperlichen Begleiterscheinungen. So kann Ärger auf den Magen schlagen, Zorn die Röte ins Gesicht treiben, Angst uns lähmen.

Unser emotionales Gedächtnis befindet sich im **Mandelkern** (Amygdala), der – paarig angelegt – in der unteren Gehirnhälfte sitzt und über Nervenbahnen direkt mit der Sinneswahrnehmung verbunden ist. Der Mandelkern versetzt uns in die Lage, in Gefahrensituationen ohne nachzudenken zu reagieren, weil die emotionale Information sehr viel schneller verarbeitet und in Reaktionen umgesetzt wird (vgl. Abb. 121):

Ein Mensch tritt bei einem Waldspaziergang auf einen Holzstumpf, unter dem sich eine Schlange versteckt hatte. Die visuelle Information (Schlange) gelangt zunächst zur Sehregion des Thalamus und wird von dort an die Sehrinde weitergeleitet, wo sie analy-

siert wird. Gleichzeitig wird ein Teil der visuellen Information über eine kurze und schnelle Verbindung zum Mandelkern geleitet, der sofort eine reflexhafte Schutzreaktion (Zurückspringen) und über den Hypothalamus die dazu notwendigen körperlichen Anpassungsreaktionen auslöst (Herzschlag, Blutdruck usw., vgl. dazu Kap. D.5.3). Diese Information ist sehr ungenau und schemenhaft. In der Zwischenzeit verarbeitet die Sehrinde die visuelle Information sehr viel genauer und analysiert auch die Angemessenheit der ausgelösten Alarmreaktion. Das „Verrechnungsergebnis“ wird wiederum zum Mandelkern geleitet, sodass Verhalten und körperliche Reaktionen neu abgestimmt werden können. Der Mandelkern setzt also nicht nur Reaktionen in Gang, die unbewusst gesteuert werden, sondern verfügt auch über die Fähigkeit, einfache emotionale Erinnerungen zu speichern und entsprechende Reaktionen auszulösen. So gibt es viele Kindheitserfahrungen, die im späteren Leben Gefühle und Handlungen auslösen können, deren Ursachen uns nicht bewusst sind, weil der jeweilige emotionale Gehalt im Mandelkern gespeichert wurde (z. B. Angst vor Dunkelheit).