

Elektroenzephalografie

Die Elektroenzephalografie (EEG) ist eine Methode zur Messung der summierten elektrischen Aktivität des Gehirns durch Aufzeichnung der Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche. Das EEG ist neben der Elektroneurografie (ENG) und der Elektromyografie (EMG) eine standardmäßige Untersuchungsmethode in der Neurologie.

Ursache dieser Potentialschwankungen sind physiologische Vorgänge einzelner Hirnzellen, die durch ihre elektrischen Zustandsänderungen zur Informationsverarbeitung des Gehirns beitragen. Entsprechend ihrer spezifischen räumlichen Anordnung addieren sich die von einzelnen Neuronen erzeugten Potentiale auf, so dass sich über den gesamten Kopf verteilte Potentialänderungen messen lassen.

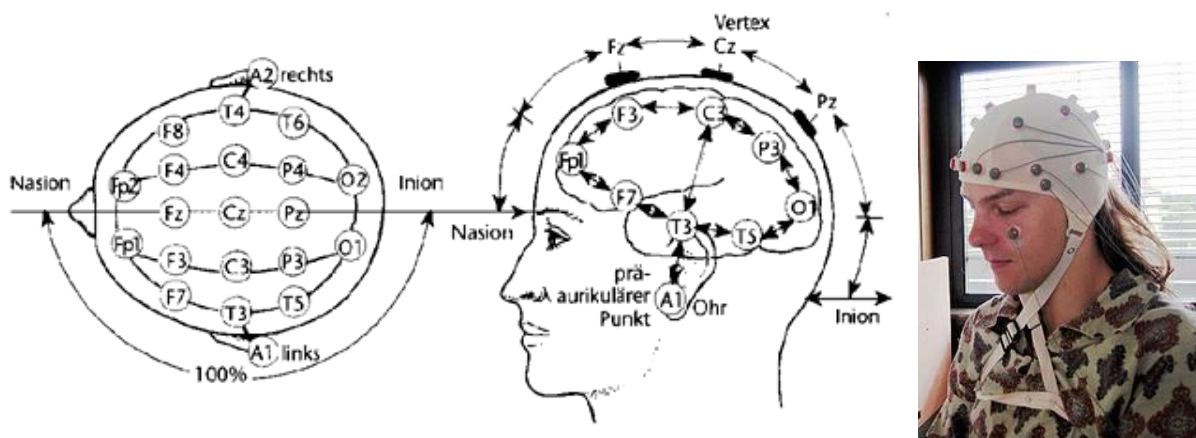
Zur klinischen Bewertung wird eine Aufzeichnung in mindestens zwölf Kanälen von verschiedenen Elektrodenkombinationen benötigt.

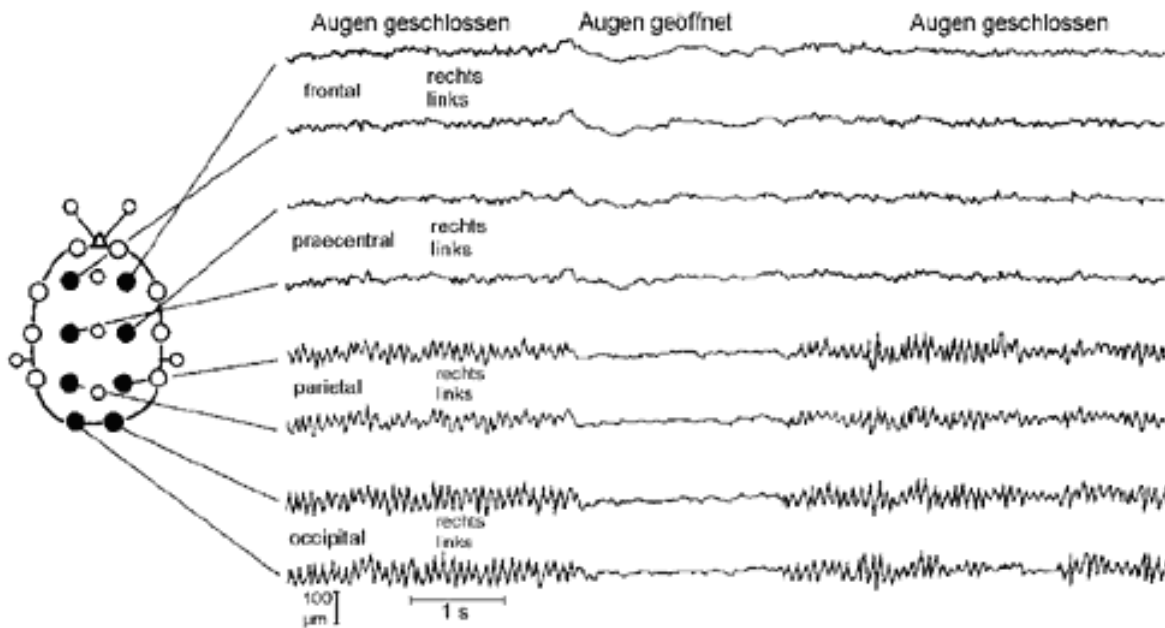
Die Ortsauflösung des üblichen EEGs liegt bei mehreren Zentimetern. Eine höhere Ortsauflösung ist durch Auflegung der Elektroden nach neurochirurgischer Eröffnung des Schädels direkt auf die zu untersuchende Hirnrinde möglich Elektrocorticogramm (ECoG), z. B. vor epilepsiechirurgischen Eingriffen. Das ECoG ermöglicht eine räumliche Auflösung von unter 1 cm.

Messverfahren

Für die auf der Kopfhaut zu messenden Signale in der Größenordnung von 5 bis 100 μV (1 Mikrovolt = 1 Millionstel Volt) kommen empfindliche Differenzverstärker zum Einsatz mit hoher Gleichtaktunterdrückung zur Unterdrückung eines Netzbrummens und anderer Störeinflüssen. Aus Gründen der Patientensicherheit ist dieser bei als Medizingerät zugelassenen Elektroenzephalographen als Isolationsverstärker implementiert, wodurch gleichzeitig aber auch die Gleichtaktunterdrückung erhöht wird.

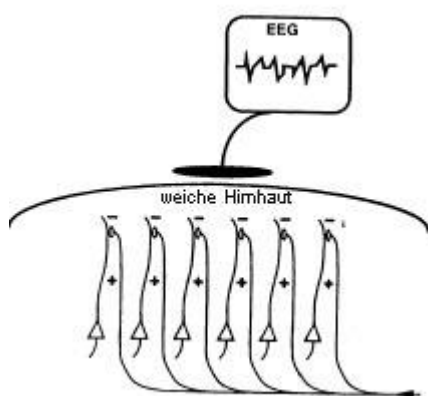
Die Elektroden für das EEG werden entsprechend dem 10-20-System angebracht.





Entstehung der Potentiale

Man nimmt an, dass die kortikalen Spannungsschwankungen eine Folge exzitatorischer und inhibitorischer postsynaptischer Potentiale sind, die mit einer gewissen Synchronizität innerhalb größerer Nervenzellgruppen auftreten. Die postsynaptischen Potentiale dürften im wesentlichen an den Dendriten der sogenannten Pyramidenzellen der obersten Hirnrindenschicht auftreten. Neben den Nervenzellen sind auch Gliazellen (Stützzellen) an der Entstehung des EEG beteiligt. Man weiß jedoch, dass die Wellen im Cortex (Hirnrinde) ihren Entstehungsort haben, da die Stromschwankungen aus den tiefergelegenen Hirnarealen nicht bis an die Hirnoberfläche kommen. Etwa Drittel der Großhirnrinde liegt nahe an der Schädeloberfläche, von dort leitet das EEG überwiegend die Potentialdifferenzen ab.

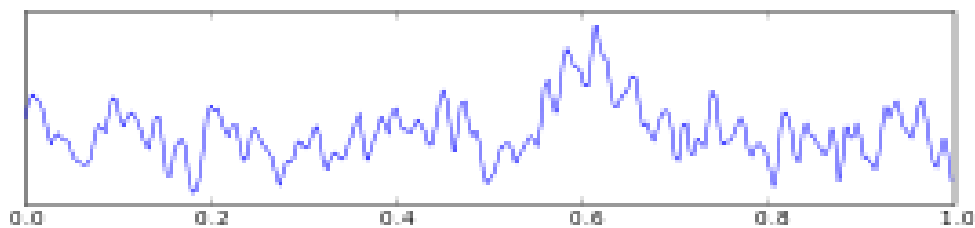


Das EEG misst damit die elektrische Aktivität von Hirnrinden nahen Neuronen, die der Schädeldecke nahe sind. Kernstrukturen in subkortikalen Bereichen des Gehirns wie beispielsweise dem Thalamus nehmen jedoch Einfluss auf diese Potentialdifferenzen an der Hirnoberfläche. Potentialschwankungen im EEG werden in erster Linie durch exzitatorische (erregende) postsynaptische Potentiale (auch EPSP) im Bereich der apikalen Dendriten geprägt. Das Hirn leitet sehr schlecht, daher kommt es zu einem zu großen Spannungsabfall. Es ist allerdings schwer, eine Stelle an der Schädeldecke zu finden, an der man die Potentialdifferenzen gut messen kann.

EEG-Frequenzbänder

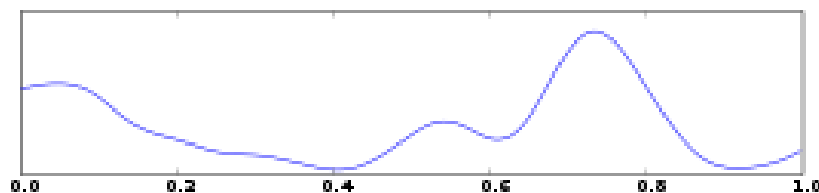
Das EEG lässt sich in verschiedene Frequenzbänder (sogenannte EEG-Bänder) unterteilen, wobei die Anzahl von Bändern wie auch die genaue Einteilung von verschiedenen Autoren verschieden angegeben wird. Die Einteilung der Frequenzbänder und deren Grenzen sind historisch bedingt und decken sich nicht durchgehend mit Grenzen, die auf Grund modernerer Untersuchungen als sinnvoll gelten. So wurde beispielsweise das Theta-Band in einen Bereich Theta 1 und Theta 2 aufgeteilt, um den unterschiedlichen Bedeutungen der Teilbereiche Rechnung zu tragen.

Die EEG-Auswertung kann visuell oder durch Software-Algorithmen mit Mustererkennung erfolgen. So deutet z. B. ein sehr asynchrones Muster aller Frequenzbänder auf starke emotionale Belastung oder Verlust der willentlichen Kontrolle hin, während vermehrt langsame Wellen bei gleichzeitig wenigen schnellen Wellen auf einen Schlaf- oder einen Döszustand hinweisen.



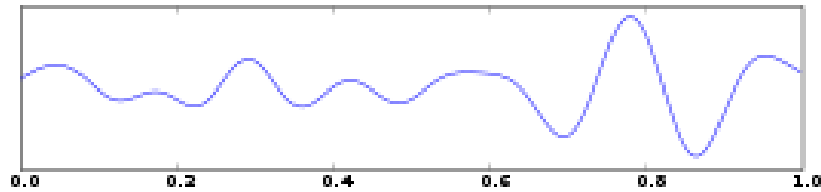
EEG-Signal von einer Sekunde Dauer

Delta-Wellen weisen eine niedrige Frequenz von 0,1 bis <4 Hz auf. Sie sind typisch für die meist traumlose Tiefschlafphase (N3, slow wave sleep SWS). Bei Säuglingen sind sie auch im Wach-EEG physiologisch, bei älteren Kindern können sie in den normalen occipitalen Grundrhythmus eingelagert sein (delta de jeunesse, posterior slow waves of the youth). Unter pathologischen Bedingungen treten sie auch im Wachzustand fokal (umschrieben) oder generalisiert (diffus) auf und zeigen dann eine Hirnfunktionsstörung oder Hirnläsion an. Beispiele sind Delta-(Theta-)Herde bei umschriebenen tiefliegenden Hirnläsionen (z. B. Hirnblutung, Hirninfarkt, Hirntumor), die frontale, intermittierende Delta-Aktivität (FIRDA) im Rahmen von Hirnfunktionsstörungen und die temporale, intermittierende Delta-Aktivität bei Temporallappen-Epilepsien (Schläfenlappen-Epilepsien).



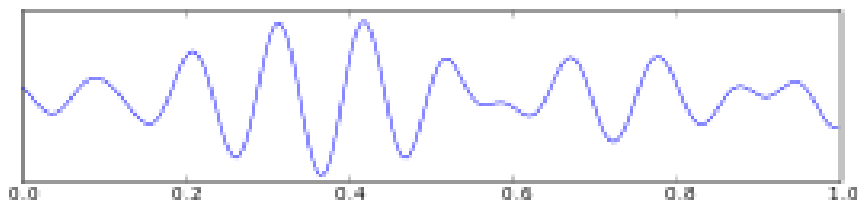
Theta-Wellen

Als Theta-Welle wird ein Signal im Frequenzbereich zwischen 4 und <8 Hz bezeichnet. Sie treten vermehrt bei Schläfrigkeit und in den leichten Schlafphasen N1 und N2 auf. Im Wachzustand sind sie bei Kleinkindern physiologisch, bei Erwachsenen können sie auf eine Hirnfunktionsstörung oder eine Hirnläsion hinweisen (s. Delta-Wellen).



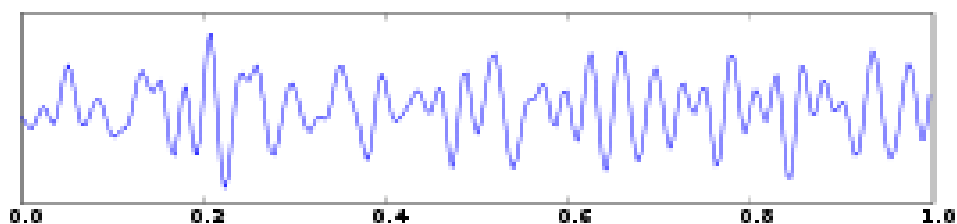
Alpha-Wellen

Als Alpha-Welle wird ein Signal im Frequenzbereich zwischen 8 und 13 Hz bezeichnet. Ein verstärkter Anteil von Alpha-Wellen wird mit leichter Entspannung bzw. entspannter Wachheit, bei geschlossenen Augen, assoziiert. Alpha-Wellen werden als emergente Eigenschaft betrachtet. Alpha-Wellen treten hauptsächlich bei geschlossenen Augen auf und werden mit dem Öffnen der Augen durch Beta-Wellen ersetzt (Berger-Effekt). Den gleichen Effekt erreicht man bei geschlossenen Augen, wenn man z. B. eine einfache Rechenaufgabe im Kopf zu lösen beginnt.



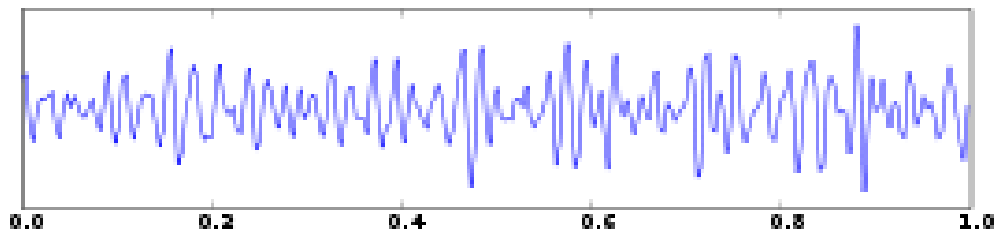
Beta-Wellen

Als Beta-Welle wird ein Signal im Frequenzbereich zwischen >13 und 30 Hz bezeichnet. Das Auftreten von Beta-Wellen hat verschiedene Ursachen und Bedeutungen, z. B. kommen Beta-Wellen bei etwa 8 % aller Menschen als normale EEG-Variante vor. Beta-Wellen entstehen aber auch als Folge der Einwirkung bestimmter Psychopharmaka oder des REM-Schlafs. Physiologisch treten β -Oszillationen außerdem z. B. beim konstanten Anspannen eines Muskels auf.



Gamma-Wellen

Als Gamma-Welle wird ein Signal im Frequenzbereich über 30 Hz bezeichnet. Sie tritt zum Beispiel bei starker Konzentration, Lernprozessen oder dem Meditieren auf. Bei Mönchen mit langjähriger Meditationspraxis werden über 30-fach erhöhte Amplituden gemessen.^[1] Neuere Forschungen zeigten das Auftreten des Gammabandes bei der sogenannten Top-Down-Regulierung und der Synchronisation von verschiedenen Hirnarealen zur Integration verschiedener Qualitäten eines Stimulus. Sie sind auf einem EEG-Streifen mit bloßem Auge nicht zu sehen.



Sharp-Waves

Steil ansteigende bzw. abfallende EEG-Linien. Sie sind epilepsietypische Potentiale (ETPs). Sie dauern etwa 80 - 200 ms an, ragen aus der Grundaktivität hervor und sind von den kürzeren Spikes abzugrenzen.

Sharp-Slow-Wave

Sharp-Wave mit einer nachfolgender hochgespannten langsamen Welle (meistens Delta-Wellen).

Spike-Waves-Komplex

Spitzenförmige Ausschläge mit nachfolgender hochgespannter langsamen Welle (meist Delta-Wellen) über einen längeren Zeitraum. S-W-Komplexe treten meist in Gruppen oder Serien, allerdings überwiegend generalisiert, auf. Der „klassische“ SW-Komplex hat eine Frequenz um 3 Hz.

Slow Cortical Potentials

Slow Cortical Potentials (SCP; dt.: langsam veränderliche kortikale Potentialschwankungen) sind Potentialschwankungen in der Größenordnung von 100 bis 200 μV und einer zeitlichen Dauer von einer bis wenige Sekunden. Diese sind damit um ein Vielfaches größer als die EEG-Wellen Delta bis Gamma, sind aber in einem herkömmlichen Elektroenzephalogramm nicht sichtbar, da sie mittels Hochpass-Filter üblicherweise herausgefiltert werden.

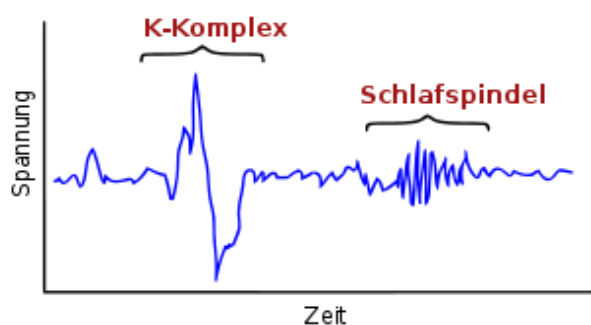
Schlafspindeln

Schlafspindeln sind typische Wellenmuster für die Non-REM-Schlafphase; treten auch im Tiefschlaf auf. Sie entstehen durch Rückkoppelung in thalamocorticalen Netzwerken und deuten auf eine Hemmung von Wahrnehmungsreizen im Thalamus. Schlafspindeln werden daher als schlafstabilisierend angesehen. Durch Frequenzanalyse lassen sich zwei Arten von Spindeln abgrenzen: Spindeln mit 11,5-13,5 Hz haben ein frontales, Spindeln mit 12,5-14,5 Hz ein zent-

rales Maximum. Unter Barbituraten (z. B. Phenobarbital) und Benzodiazepinen (z. B. Diazepam) kommt es zu einer Zunahme und Frequenzbeschleunigung (bis 15,5 Hz) von Spindeln.

K-Komplexe

K-Komplexe sind Wellenmuster, die typischerweise in der Non-REM-Schlafphase auftreten, vereinzelt bereits im Wach-Schlaf-Übergang nachweisbar sein können und auch im Tiefschlaf noch anhalten. Die biphasische Wellenform zeigt einen steilen Aufstrich bis zum negativen Maximum, einem etwas langsameren Abfall zur Positivität und anschließend einer Rückkehr zur Nulllinie. Die Amplitude beträgt über 75 μV , teilweise über 200 μV . Eine Schlafspindel kann unmittelbar folgen. Auch Weckreaktionen (Arousals) können durch K-Komplexe eingeleitet werden. Physiologisch handelt es sich um eine EEG-Aktivierung durch externe oder interne Stimuli, so dass K-Komplexe auch als Form evozierter Potentiale angesehen werden können.



K-Komplex und Schlafspindel in der NREM-Schlafphase

Vertex-Wellen

Vertex-Wellen sind charakteristisch für den Wach-Schlaf-Übergang, treten aber auch im weiteren Schlafverlauf vor allem im stabilen Leichtschlaf auf. Sie haben eine Dauer von weniger als 200 ms, sind weitgehend symmetrisch und zeigen eine scharfe negative Spitze. Ihr Maximum liegt über dem Vertex. Physiologisch handelt es sich wahrscheinlich um eine stadienspezifische Subgruppe der K-Komplexe.

Varianten und Einflüsse

Es gibt verschiedene Normvarianten, Beta-EEG, Alpha-Varianten, 4/s- Grundrhythmusvarianten und Niederspannungs-EEGs, dabei muss keine Alpha-Aktivität vorhanden sein, EEGs ohne jegliche rhythmische Alpha-Aktivität sind dabei selten, häufiger sind EEGs, die einen passageren Alpha-Rhythmus als Lidschlussreaktion oder einen Alpha-Rhythmus unter Hyperventilation zeigen. Ursache kann hier eine Verminderung der Vigilanz sein. Alkoholgenuss führt dosisabhängig zu Vigilanzminderung mit den damit verbundenen typischen EEG-Veränderungen: bei 0,3 bis 0,5 Promille kommt es zu verstärkter Synchronisation im Sinne einer Dynamischen Rigidität, bei 0,5 bis 1 Promille zu einer Verlangsamung der Grundaktivität und im Vollrausch zu einer diffusen Dysrhythmie. Bei etwa einem Drittel der Alkoholkranken ist ein Niederspannungs-EEG mit spärlicher Alpha-Einstreuung zu beobachten, das im Allgemeinen im Sinne einer konstitutionsgebundenen Anomalie (trait) interpretiert wird. In der Entgiftungsphase ist jedoch häufig eine Zunahme der Alpha-Aktivität, insbesondere posterior, zu be-

obachten. Unter zahlreichen Psychopharmaka (z. B. Neuroleptika, Benzodiazepine, Barbiturate, etc.) und Antikonvulsiva kann es zu Verlangsamung und/oder Minderausprägung der Alphaaktivität kommen. Beta-Wellen werden häufig von Benzodiazepinen ausgelöst, diese werden dann im Gegensatz zur Normvariante nicht blockiert. Unter Carbamazepin kommt es zu einer Alpha-Abnahme und Theta-Zunahme. Eine darüberhinaus gehende Verlangsamung zeigte einen Zusammenhang mit ungünstiger kognitiver Entwicklung. Einige Antidepressiva zeigen im EEG ein 'thymoleptisches' (Imipramin- oder Amitryptilin-ähnliches) Profil mit einer Abnahme der Alpha-Ausprägung als Ausdruck einer sedativen Wirkung. Kokain-User zeigen auch nach Abstinenz persistierend vermehrt Alpha- und vermindert Delta-Aktivität, vor allem über anterioren Arealen. Schulkinder, die in utero Kokain exponiert waren, sollen dasselbe EEG-Muster haben. Unter Morphinen kommt es (zumindest bei Polytoxikomanen) zu vermehrter Alpha- und Theta-Tätigkeit, jedoch verminderter Delta-Aktivität. Einige Antidepressiva zeigen im EEG ein 'thymoretisches' (Desipramin-ähnliches) Profil mit einer Zunahme der Alpha-Ausprägung.

Anwendungen in der Medizin

Neurologie: Standarduntersuchung.

Epilepsie: Diagnose und Verlaufskontrolle. Neben hochamplitudiger Aktivität während eines Anfalls fallen besonders geformte Graphoelemente auch im anfallsfreien Intervall auf.

Hirntod: Ausbleiben von Spannungsschwankungen ist ein Hilfskriterium bei der Bestimmung des Hirntods.

Koma- und Narkosetiefe: Anhand spezifischer Kriterien können Koma- und Narkosetiefe bestimmt werden.

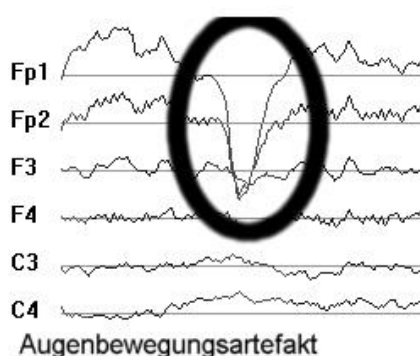
Schlafmedizin: Meistens mit einem reduzierten Elektrodensatz Ableitung eines Ganznacht-EEGs. Aus diesem lassen sich Informationen über die Einschlaf latenz, die Verteilung der Schlafstadien (dargestellt als *Hypnogramm*), Weckreaktionen (spontan oder infolge äußerer bzw. innerer Störquellen wie z. B. Lärm oder schlafbezogene Atmungsstörungen) und weitere physiologische und pathologische Prozesse im Schlaf gewinnen. Meist wird das EEG im Rahmen der Polysomnographie mit der Messung weiterer physiologischer Parameter kombiniert. Beim EEG, welches zur Schlafstadienanalyse im Schlaflabor verwendet wird, werden – im Vergleich zum kompletten EEG des 10-20-Systems – meist nur einige wenige Ableitungen vollzogen. Standardmäßig werden die Kanäle C3 / A2, C4 / A1 abgeleitet.

Artefakte:

Elektrodenartefakte: Wackeln der Ableitkabel oder schlechter Sitz der Elektroden

Bewegungsartefakte: Bewegungen des Kopfes

Biologische Artefakte: Potentiale, die von anderen Körperteilen ausgehen (Augenlid, Muskeln, Gefäße, Kau und Schluckbewegungen)



EEG-Frequenzbänder				
Frequenzband		Frequenz	Zustand	Mögliche Effekte
Delta		0,5 – <4 Hz	Tiefschlaf, Trance	
Theta	Niedrig (Theta 1)	4 – 6,5 Hz	Hypnagogisches Bewusstsein (Einschlafen), Hypnose, Wachträumen	
	Hoch (Theta 2)	6,5 – <8 Hz	Tiefe Entspannung, Meditation, Hypnose, Wachträumen	Erhöhte Erinnerungs- und Lernfähigkeit, Konzentration, Kreativität
Alpha		8 – 13 Hz	Leichte Entspannung, Super Learning (Unterbewusstes Lernen), nach innen gerichtete Aufmerksamkeit, geschlossene Augen	Erhöhte Erinnerungs- und Lernfähigkeit
Beta	Niedrig (SMR)	>13 – 15 Hz	Entspannte nach außen gerichtete Aufmerksamkeit	Gute Aufnahmefähigkeit und Aufmerksamkeit
	Mittel	15 – 21 Hz	Hellwach, normale bis erhöhte nach außen gerichtete Aufmerksamkeit und Konzentration	Gute Intelligenzleistung
	Hoch	21 – 38 Hz	Hektik, Stress, Angst oder Überaktivierung	Sprunghafte Gedankenführung
Gamma		38 – 70 Hz	Anspruchsvolle Tätigkeiten mit hohem Informationsfluss	Transformation oder neuronale Reorganisation