

Schlafstadienbestimmung nach RECHTSCHAFFEN und KALES

Übersetzung der Grundlagen und Diskussion zur Entscheidungsfindung

Alle abgeleiteten EEG Parameter werden von ein und demselben Befunder streng nach den Regeln von RECHTSCHAFFEN und KALES ausgewertet. Diese Regeln und die Schwierigkeiten und Probleme ihrer Anwendung werden im folgenden dargestellt.

Die 1960 gegründete *Association for the Psychophysiological Study of Sleep (APSS)* bildete 1967 angesichts der unsicheren Reliabilität zwischen verschiedenen Auswertern bei der Bestimmung von Schlafstadien ein Komitee, das sich die Standardisierung und Vereinheitlichung der Kriterien zum Ziel gesetzt hatte.

Ihm gehören R. J. BERGER, W. C. DEMENT, A. JACOBSON, L. C. JOHNSON, M. JOUVET, A. KALES, L. J. MONROE, I. OSWALD, A. RECHTSCHAFFEN, H. P. ROFFWARG, B. ROTH UND R. D. WALTER an.

Die Ergebnisse wurden 1968 von RECHTSCHAFFEN und KALES publiziert im

MANUAL OF STANDARDIZED TERMINOLOGY, TECHNIQUES AND SCORING SYSTEM FOR SLEEP STAGES OF HUMAN SUBJECTS.

Ausgangspunkt waren die von DEMENT und KLEITMAN vorgeschlagenen Kriterien zur Schlafstadienbestimmung. Die Terminologie entspricht der des *Terminology Committee of the International Federation for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* von 1961, die Elektrodenlokalisationen entsprechen dem *10:20 System of the International Federation* von 1958. Als technische Minimalanforderungen werden für die Schlafpolygraphie empfohlen:

- Ableitungen von EEG, EOG und EMG
- Papiergeschwindigkeit nicht unter 10 mm/sec,
- Zeitkonstante nicht unter 0,3 sec,
- Filter unter 20 Hz sollen gesondert vermerkt werden,
- die Empfindlichkeit soll bei 7,5-10 mm/50 μ V liegen,
- die Elektrodenübergangswiderstände sollen 10 k Ω zu Beginn der Ableitung nicht überschreiten.

Als EEG-Ableitprogramme werden C4 – A1 bzw. C3 – A2 vorgeschlagen.

EOG:

Die Bestimmung der Augenbewegungen erfordert die Ableitung von

- einer lateral und etwa 1 cm *oberhalb* des Epikanthus des einen Auges, sowie
- einer lateral und etwa 1 cm *unterhalb* des Epikanthus des anderen Auges gelegenen Elektrode gegen eine Referenz *einer* Ohr- oder Mastoidelektrode.

Konjugierte horizontale Augenbewegungen führen zu Ausschlägen, die außer Phase sind; technische Artefakte ergeben Ausschläge in Phase oder nur in einem Kanal; Artefakte von den Augenelektroden betreffen nur einen, solche der Referenzelektrode dagegen beide Kanäle, sind aber in Phase. Da dieses Programm eine Unterscheidung horizontaler von vertikalen Augenbewegungen nur unzureichend erlaubt, werden für entsprechende Fragestellungen zusätzlich supra- und infraorbitale Elektroden empfohlen. Die Empfindlichkeit soll bei 7,5 00/50 μV liegen, die Zeitkonstante nicht unter 0,3 sec.

EMG:

Das EMG sollte, wenn irgend möglich, mental oder submental abgeleitet werden. Die Empfindlichkeit soll 20 $\mu\text{V}/\text{cm}$ oder größer sein, Filter sollten nur soweit erforderlich eingesetzt werden. Die empfohlene Zeitkonstante ist 0,1 sec oder kürzer.

EINLEITUNGSKRITERIEN:

Die Autoren empfehlen dringend eine Auswertung Epoche für Epoche.

Als Einheit erscheint eine Seite des Registrierpapiers (30 cm) naheliegend; dies entspricht bei 10 mm/sec Papiervorschub 30 Sekunden und bei 15 mm/sec 20 Sekunden Ableitezeit. Für die Ableitung und eine Studie sollte die Epochenlänge konstant sein. Jeder Epoche wird einem Schlafstadium zugeordnet. Sind in einer Epoche verschiedene Stadien enthalten, entscheidet der größere Anteil.

Die Stadien-Definitionen sind wie folgt:

Stadium W:

Stadium W entspricht dem Wachzustand. Es ist durch die individuellen Grundrhythmen, meist durch α -Aktivität gekennzeichnet.

Movement Time (MT):

Als "MT" werden solche Epochen gewertet, die Schlafaktivität vorangehen oder ihr folgen, in denen aber mehr als die Hälfte der Epoche durch muskel- oder bewegungsbedingte Artefakte gestört sind. „MT“ ist eine eigene Kategorie und entspricht weder Stadium W noch einem Schlafstadium.

Einfache Körperbewegungen entsprechen nicht „MT“, sie sollten nicht als Epochencharakteristikum sondern separat vermerkt werden. Von „MT“ und einfachen Körperbewegungen sind *Bewegungsarousal* zu unterscheiden. Sie sind definiert durch Zunahme der EMG-Aktivität in Verbindung mit der Veränderung der EEG- oder EOG-Aktivität. Im EMG-Kanal kann die Veränderung in der vergrößerten Amplitude des EMG-Signals oder einem übersteuernden Auslenkungs-Artefakt bestehen. Im EOG-Kanal treten EMG-Aktivität, übersteuernde oder Blink-Artefakte auf. Im EEG-Kanal kommt es zu einer Abnahme der Amplitude der Grundaktivität und einer Zunahme der α -Aktivität zu hochamplitudigen Bursts sowie zu EMG-Einstreuungen oder übersteuernden Auslenkungs-Artefakten. Bewegungsarousals sind kein Epochencharakteristikum und müssen nicht vermerkt werden. Ihre Bedeutung liegt vor allem darin, dass sie bei der Schlafstadienbestimmung einen möglichen Stadienwechsel anzeigen.

Stadium 1:

Das Stadium 1 ist durch flache, unregelmäßige Aktivität mit Vorherrschen von 2 bis 7/sec-Aktivität gekennzeichnet. Schnellere Frequenzanteile sind meist von geringer Amplitude. Stadium 1 tritt während des Einschlafens, hier besonders auch mit langsamen Augenbewegungen, sowie im Schlaf nach Körperbewegungen auf. Im Verlauf finden sich im EEG Amplituden bis 75 μ V, während solcher Phasen mit hoher Amplitude kommt es auch zur Bildung von Vertexwellen die bis 200 μ V erreichen. Die Wertung einer Epoche als Stadium 1 setzt voraus, dass weder K-Komplexe noch Schlaf-Spindeln vorhanden sind. Am Übergang zum Schlafstadium 2 können Serien flacher Aktivität von 12-14/sec auftreten; solange sie jedoch weniger als 0,5 sec andauern, können sie noch nicht als Schlafspindeln gewertet werden. Das EMG hat in der Regel eine geringere Amplitude als im Wachzustand. Während des Einschlafens kommt es zu einer allgemeinen Verlangsamung der EEG-Aktivität; Ausprägung, Amplitude und Frequenz der α -Aktivität nehmen ab. Wenn in einer Epoche der α -Index 50% unterschreitet und eine flache, unregelmäßige, verlangsamte Aktivität nominiert, ist sie als Stadium 1 zu werten.

Stadium 2:

Bestimmend ist einerseits das Vorliegen von K-Komplexen und/oder Schlafspindeln, andererseits das Fehlen einer ausreichend hoch amplitudigen, langsamen δ -Aktivität, wie sie für ein Stadium 3 oder 4 zu fordern wäre. *Schlaf-Spindeln* sind definiert als ein

frequenzstabiles Muster von 12 bis 14/sec für mindestens 0,5 sec Dauer. Sechs bis sieben einzelne Wellen müssen also zu zählen sein. *K-Komplexe* bestehen aus einer initialen negativen steilen Komponente, unmittelbar gefolgt von einer langsamen, biphasisch negativ-positiven Welle, die – um anerkannt zu werden – mindestens 0,5 sec lang sein muss. Eine 12-14 (15)/sec-Aktivität kann, muss aber nicht mit ihnen zusammen auftreten. Sie werden sowohl spontan als auch als Reizantwort beobachtet. Ihr Ausprägungsmaximum liegt frontal. Im Stadium 2 können auch andere hochamplitudige, langsame Transienten auftreten, deren Morphologie nicht exakt der der K-Komplexe entspricht. Weniger als 3 Minuten Aktivität entsprechend Stadium 1 zwischen K-Komplexen und/oder Schlafspindeln, aber ohne Bewegungsarousal und ohne Muskeltonusanstieg werden dem Stadium 2 zugeschlagen. Kommt es zwischen sicheren Stadium 2-Epochen zu Arousal oder Muskeltonusanstieg, werden die Epochen davor als Stadium 2, die danach bis zur nächsten Schlafspindel oder dem nächsten K-Komplex als Stadium 1 bestimmt.

Stadium 3:

Mindestens 20%, aber nicht mehr als 50% der Epoche zeigen eine Aktivität von 2/sec oder langsamer mit Amplituden über 75 μV . Der Index wird meist geschätzt, da exaktes Messen die Auswertzeit erheblich verlängern würde. Es sollte wenn möglich am Beginn des Stadium 3 zwischen K-Komplexen und d-Wellen unterschieden werden, was jedoch nicht immer eindeutig möglich ist. Schlafspindeln können im Stadium 3 vorhanden sein, aber auch fehlen.

Stadium 4:

Mehr als 50% der Epoche ist von Aktivität von 2/sec oder langsamer mit Amplituden von Spitze zu Spitze über 75 μV bedeckt. d-Wellen stehen meist ganz im Vordergrund. Schlafspindeln können im Stadium 4 vorhanden sein.

Stadium REM:

Das Stadium REM ist durch das gleichzeitige Auftreten einer relativ flachen, unregelmäßigen Aktivität und schnellen Augenbewegung definiert. Die Grundaktivität ähnelt oft dem Stadium 1 oder Wach. Über dem Vertex und den vorderen Hirnabschnitten kommt es häufig zu sogenannten „Sägezahnwellen“. Für die Einstufung einer Epoche als Stadium REM ist zu fordern, dass das tonische EMG für die jeweilige Ableitung die relativ geringste Amplitude in der Nacht erreicht hat, meist fehlt es völlig. Gelegentlich kommen leichte Amplitudenvergrößerungen vor allem aber phasische EMG-Bursts vor. Vor allem in der ersten REM-Periode einer Nacht kommt es häufig zu einer Vermischung mit Schlafspindeln. Hier sind für

die Entscheidung, ob die Epoche dem Stadium REM oder Stadium 2 zugeordnet wird zwei Regeln wegweisend:

1. Jede Epoche Stadium 1 zwischen sicheren REM-Epochen wird auch ohne schnelle Augenbewegungen als REM gewertet, vorausgesetzt
 - a. das EMG ist flach, und
 - b. sie enthält keine Bewegungsarousal.
2. Ohne Rücksicht auf das EMG wird ein Intervall mit flacher, unregelmäßiger Aktivität zwischen Schlafspindeln und/oder K-Komplexen als Stadium 2 betrachtet, vorausgesetzt
 - a. es finden sich keine schnellen Augenbewegungen und
 - b. keine Bewegungsarousal und
 - c. die Zeit überschreitet nicht drei Minuten, weil sonst Stadium 1 entschieden werden muss (s.o.).

Beispiele:

- I. Eine Epoche mit flachem EMG zwischen zwei sicheren REM-Epochen enthält nur eine Schlafspindel. Die Epoche wird als Stadium REM gewertet.
- II. a. In einer Epoche von beispielsweise 30 Sekunden befinden sich Schlafspindeln in der zehnten und zwanzigsten Sekunde. Die vorherige wie die folgende Epoche sind sicher REM. Die ersten und letzten zehn Sekunden der Epoche sind REM, die mittleren zehn Sekunden entsprechen Stadium 2. Die Epoche wird also als REM gewertet, weil der REM-Anteil überwiegt.
- II. b. In einer Epoche von 30 Sekunden befinden sich Schlafspindeln in der fünften und fünfundzwanzigsten Sekunde. Die vorherige und die folgende Epoche sind sicher REM. Die ersten und letzten fünf Sekunden der Epoche sind REM, die mittleren zwanzig Sekunden entsprechen Stadium 2. Diese Epoche wird daher als Stadium 2 gewertet.
- III. Drei Epochen mit flachem EMG und REM typischen EEG. Schnelle Augenbewegungen in den ersten fünf Sekunden der ersten und den letzten fünf Sekunden der dritten Epoche. Schlafspindeln sind in der zwanzigsten Sekunde der ersten und dritten Epoche vorhanden. In der mittleren Epoche finden sich weder Schlafspindeln noch schnelle Augenbewegungen.
 - a. Die erste Epoche wird als Stadium REM,
 - b. Die zweite Epoche als Stadium 2 gewertet und
 - c. Ebenso die Dritte.

Zur Bestimmung des REM-Beginns gibt das *Manual* folgende Empfehlungen:

- I. Schlafspindeln und K-Komplexe sistieren und das EEG wird niederamplitudig und unregelmäßig einige Epochen vor Beginn der schnellen Augenbewegungen:
 - a. Bei flachem EMG und ohne Bewegungsarousal werden die Epochen ab der letzten Schlafspindel bzw. dem letzten K-Komplex als REM gewertet.
 - b. Die Epochen bis zur letzten Schlafspindel bzw. dem letzten k-Komplex werden unabhängig vom EMG als Stadium 2 gewertet.
 - c. Die gleichen Regeln gelten beim Übergang vom Stadium 3 oder 4 in REM.
- II. Schlafspindeln und K-Komplexe sistieren und das EEG wird niederamplitudig und unregelmäßig einige Epochen vor Beginn der schnellen Augenbewegungen, das EMG bleibt aber höheramplitudig:
 - a. REM-Beginn ist in der Epoche, in der der Muskeltonus auf seinen geringsten nächtlichen Wert absinkt oder verschwindet.
 - b. Der Teil nach der letzten Spindel bzw. dem letzten K-Komplex und vor dem Absinken des EMG-Tonus wird dem vorherigen Schlafstadium zugeschlagen, sofern er weniger als 3 Minuten dauert.
 - c. Im anderen Fall wird es Stadium 1.
- III. Schlafspindeln und K-Komplexe sistieren und die EEG-Grundaktivität wird einige Epochen vor Beginn der schnellen Augenbewegungen niederamplitudig und unregelmäßig, in dieser Zeit kommt es zu einer Bewegungsarousal.
 - a. Sofern das EMG niedrig ist und keine Anzeichen für einen Stadienwechsel vorliegen, gelten die Epochen nach Arousal als REM.
 - b. Ist das Intervall zwischen der letzten Schlafspindel bzw. dem letzten K-Komplex und der Arousal kürzer als 3 Minuten, entspricht es Stadium 2.
 - c. Ist das Intervall länger als 3 Minuten, wird es zu REM zugeschlagen.
- IV. Schlafspindeln und K-Komplexe sistieren und das EEG wird niederamplitudig und unregelmäßig einige Epochen vor Beginn der schnellen Augenbewegungen, in dieser Zeit kommt es zu einer Bewegungsarousal und das EMG ist für einige Epochen noch zu hoch für REM.
 - a. Die Epochen nach der Arousal, in denen das EMG noch hoch ist, werden Stadium 1.
 - b. REM beginnt mit dem Absinken des Muskeltonus.
 - c. Die Epochen vor der Arousal gelten in Abhängigkeit von der „Drei-Minuten-Regel“ als Stadium 2.

Folgende Regeln gelten für das Ende von REM:

- I. Flache, unregelmäßige Aktivität nach REM ohne rasche Augenbewegungen bei flachem EMG und ohne Arousal, Schlafspindeln und/oder K-Komplexe wird REM.

- II. Flache, unregelmäßige Aktivität nach REM ohne rasche Augenbewegungen bei flachem EMG und ohne Arousal, Schlafspindeln und K-Komplexe wird REM bis zum Anstieg der EMG-Amplitude, danach Stadium 1.
- III. Eine Bewegungsarousal unterbricht REM; EEG und EMG werden schnell wieder REM-typisch:
 - a. Die Epochen werden in Abhängigkeit vom Bewegungsausmaß zu Stadium 1.
 - b. Obwohl sie auch in REM vorkommen können, sprechen langsame Augenbewegungen nicht gegen Stadium 1.
 - c. Das Auftreten von a-Aktivität erleichtert die Entscheidung.
 - d. Vertexzacken sprechen für Stadium 1, Sägezahnwellen für Stadium REM.
 - e. Wurde nach der Arousal aus REM Stadium 1 bestimmt, sind die folgenden Epochen bis zum nächsten sicheren REM bzw. bis zur nächsten Schlafspindel bzw. K-Komplex Stadium 1.

Die Verbindlichkeit der Regeln wird mehrfach im *Manual* erwähnt. Dennoch zeigen viele der entsprechenden Publikationen zum Teil erhebliche Abweichungen in der Anwendung. So lehnen z.B. FORET et al. ein Amplituden-Kriterium zur Bestimmung des Schlafstadium 4 ab.

WEBB und DREBLOW werten mit Epochenlängen von 60 Sekunden aus.

KUBICKI et al. diskutieren die Unzulänglichkeiten.

So sollte die Ableitung nur von zentralen Elektrodenlokalisationen zugunsten einer möglichst umfassenden Mehrkanal-Registrierung verlassen werden.

Durch die ausschließliche Orientierung der Schlaf-EEG-Auswertung an zentralen Elektrodenpositionen werden

- Muster die nur außerhalb der Zentralregion auftreten (wie z.B. Mitten-Pattern, subvigile β -Bursts oder Schlaf-Lambda) nicht berücksichtigt
- solche Graphoelemente, deren *Verteilung* ein entscheidendes differentielles Kriterium ist, kaum beurteilbar (das gilt besonders für die Abgrenzung von K-Komplexen gegen Vertex-Elemente und d-Wellen)
- bei a-Schlafmuster-Trägern (SCHEULER [431]) Prä-Arousals von der Grundaktivität nicht abgegrenzt.

Die umfassende kortikale Registrierung führt bei Anwendung der RECHTSCHAFFEN und KALES-Regeln zu veränderten Prozentanteilen einzelner Stadien am Gesamtschlaf, insbesondere werden mehr Epochen den Stadien 2, 3 und 4 zuerkannt.

Ein gravierender Einwand ist die Verkennung physiologischer Gegebenheiten durch die rigide Anwendung der Regeln.

Gerade ältere Probanden und Patienten zeigen als konstantes und individuelles Merkmal „deformierte“ K-Komplexe ohne die geforderte positive Deflektion. Diese müssen in eine erweiterte Regelformulierung einbezogen werden.

Bei den Schlafspindeln ist eine Ausdehnung des Frequenzbereichs (12-14/sec) um 1/sec nach unten und oben erforderlich. Das Amplitudenkriterium (75 μ V) für d-Wellen ist unangemessen, da durch seine Einhaltung gerade bei älteren Probanden, die häufig geringere Amplituden zeigen, viele Epochen mit vorherrschender d-Tätigkeit im EEG nicht als Stadium 3 oder 4 anerkannt werden können. Andere Autoren [492] akzeptieren daher synchronisierte d-Tätigkeit ab 40 μ V. Für unser Thema von besonderer Bedeutung ist die Definition der REM-Perioden durch die schnellen Augenbewegungen. Sie werden gerade bei der ersten REM-Periode häufig vermisst. Hier muss, will man dem tatsächlichen Schlafverlauf gerecht werden, ein „REM sine REM“ dann anerkannt werden, wenn – ohne schnelle Augenbewegungen – bei flachem tonischen EMG zentral Sägezahnwellen auftreten. Unbedingt zu vermeiden sind im weiteren „labortypische“ Papiervorschübe. Eine einheitliche Ableitung mit 15 mm/sec wird empfohlen.

Verschiedentlich werden von anderen Autoren Erweiterungen vorgenommen.

Im Erscheinungsjahr des *Manual* schlägt SCHWARTZ den Begriff des „intermediären Schlafs“ als weiteres Stadium, zwischen Tiefschlaf und REM, vor. Ein Konzept das sich nicht durchsetzen konnte.

MOSES und NAITOH gehen auf die Frage der Kontinuität des REM-Schlafes ein. Eine ununterbrochene Folge von REM-Epochen nennen sie „REM-Episoden“, werden die REM-Epochen von bis zu fünfzehn Minuten anderer unterbrochen, sprechen sie von „REM-Perioden“.

Bei der Auswertung unserer Daten werden, trotz Vorbehalte, die Regeln des *Manuals* weitestgehend eingehalten. Bei Abweichungen erfolgt eine Beschreibung sowie eine Begründung der angewendeten Kriterien.

Neurologie 2, Otto von Guericke Universität
Leipziger Str. 44, 39120 Magdeburg