

Aus dem Psychologischen Institut an der Universität Wien
(Vorstand: Prof. Dr. H. ROHRACHER).

Ein einfacher Index zur Auswertung der Alpha-Wellen des Elektrencephalogramms.

Von

HUBERT ROHRACHER.

(*Eingegangen am 8. Dezember 1949.*)

Die zahlenmäßige Auswertung der gehirnelektrischen Spannungsschwankungen bereitet erheblich größere Schwierigkeiten als die rechnerische Behandlung anderer biologischer Kurven. Dies hat seinen Grund vor allem darin, daß das EEG (im Gegensatz z. B. zum EKG oder zu einer Atmungskurve) keine innere Gliederung aufweist; Serien von größeren und kleineren Alpha-Wellen wechseln in ganz unregelmäßiger Folge mit Phasen ab, in denen nur Beta-Wellen mit vereinzelten Alpha-Schwankungen zu sehen sind. Ein einigermaßen getreues Bild von der Spannungsproduktion einer bestimmten Rindenstelle erhält man daher — günstige Versuchsbedingungen wie möglichst vollkommene körperliche und geistige Ruhe der Versuchsperson vorausgesetzt — nur, wenn man Aufnahmen von längerer Dauer (mindestens 1 min) macht. Um gut auszählbare Kurven zu erhalten, muß man den Papierfilm zur Registrierung der Alpha-Wellen mit mindestens 15 mm Geschwindigkeit pro Sekunde, zur Registrierung der Beta-Wellen mit wenigstens 60 mm pro Sekunde ablaufen lassen. Man erhält dann bei einer Ableitungsdauer von 1 min bei der Alpha-Registrierung Oszillogramme von mindestens 90 cm Länge. So aufschlußreich der unmittelbare optische Eindruck beim Vergleich solcher meterlanger Kurvenzüge für das geübte Auge auch ist — für die exakte Darstellung der in ihnen zum Ausdruck kommenden biologischen Prozesse und vor allem zum Vergleich verschiedener Ableitungen unter verschiedenen Versuchsbedingungen bedarf es einer Auswertungsmethode, die eine zahlenmäßige Wiedergabe der wesentlichen Merkmale des Kurvenzuges ermöglicht.

Eine befriedigende Lösung lag bisher nicht vor. Methoden zur zahlenmäßigen Auswertung des EEG wurden von H. und P. DAVIS¹, von H. HOAGLAND² und von G. HOECHEL³ entwickelt.

Der „Alpha-Index“ von DAVIS bringt die Zeiten, in denen bei einer 30 sec langen Ableitung Alpha-Wellen von mehr als 20 Mikrovolt auftraten, in Prozenten der Gesamtzeit zum Ausdruck; nicht die Alpha-Wellen als solche, sondern die Zeiten ihres Auftretens werden zueinander in Beziehung gesetzt. Dieses Verfahren

stellt eine Lösung dar, welche zwar der ganzen Kurve gerecht wird, jedoch die Spannungsgröße unberücksichtigt läßt; Alpha-Wellen von 25 Mikrovolt sind solchen von 50 oder mehr gleichgestellt. Außerdem ist die Feststellung der Alpha-Zeiten ziemlich umständlich und mühsam. Der „Delta-Index“ von HOAGLAND wird gewonnen, indem man mit einem Kartenwegmesser alle Schwankungen von weniger als 8 Hz (die Delta-Wellen) voll ausfährt, während man alle Schwankungen höherer Frequenz (also die Alpha- und Beta-Wellen) in ihrer Mitte durchfährt. Gemessen werden also nur die großen, langsamten Delta-Schwankungen; vergleichbar ist das Ergebnis einer solchen Messung natürlich nur mit Resultaten, die bei gleicher Verstärkung und Papiergeschwindigkeit gewonnen wurden (bei HOAGLAND war die Verstärkung 5 mm Ausschlag bei 100 Mikrovolt und die Ablaufgeschwindigkeit 2 cm pro Sekunde). Die Forderung einer einheitlichen Verstärkung bei allen gehirnelektrischen Untersuchungen ist jedoch schwer durchführbar, besonders für die von HOAGLAND verwendete sehr geringe Verstärkung.

Der „Wellenindex“ von HOECHEL vermeidet diese Nachteile der Unvergleichbarkeit wie des Ausschlusses bestimmter gehirnelektrischer Spannungs-Schwankungen; er besteht aus dem Produkt der größten Wellenlänge und Amplitude, wobei als Maßeinheiten Amplitude und Wellenlänge eines großen normalen Alpha-Rhythmus mit 100 Mikrovolt und 100 Millisek verwendet wurden. Berücksichtigt wurden nur solche langsamten Wellen, die innerhalb von 10 sec mindestens dreimal vorkamen. Die Berechnung geschah also, wenn ich die kurze Darstellung HOECHELS richtig verstanden habe, auf folgende Weise: aus dem „Hauptrhythmus mit den größten Amplituden“ sucht man die größte Wellenlänge heraus; sie sei z. B. 250 msec (also 4 Hz) und habe eine Amplitude von 120 Mikrovolt, so ergibt sich, bezogen auf die Maßeinheit von 100 msec und 100 Mikrovolt (250/100 und 120/100) ein Wellenindex von $2,5 \times 1,2 = 3,0$. „Amplitude und Wellenlänge müssen immer von den gleichen Schwankungen berechnet werden. Bei mehreren Wellen von nur wenig verschiedenen Werten wird der häufigste Durchschnittswert der größten Amplituden und Wellenlängen genommen, der mindestens dreimal in 10 sec kommt; z. B. Wellenlängen von 280, 300 und 330 msec bei Amplituden von 140, 150 und 160 Mikrovolt ergeben als W. I.: 1,5, 3,05, 4,5“ (S. 283).

Berücksichtigt wird also nur die größte Wellenlänge (d. h. die langsamste Frequenz) und die größte Amplitude der Spannungsschwankungen, die innerhalb von 10 sec mindestens 3 mal vorkommen. Dies bedeutet, daß z. B. in einem Oszillogramm, das neben einigen großen, tragen Delta-Wellen auch regelmäßige Alpha-Wellen aufweist, diese letzteren gänzlich unberücksichtigt bleiben. Weist ein EEG nur wenige Alpha-Wellen und keine Delta-Wellen auf, so kommt das seltene Auftreten der Alpha-Wellen im Index nicht zum Ausdruck; er ist derselbe wie in einem EEG mit ununterbrochenen Alpha-Wellen, deren größte dieselbe Amplitude haben wie die vereinzelten im vorhin angenommenen Fall. Gerade der Umstand, ob die Alpha-Wellen selten oder häufig auftreten, ist aber von Bedeutung; denn sie stellen die einheitlichste, bei allen Menschen gleichartigste und für das ganze EEG charakteristischste Wellengruppe dar. Die großen und diagnostisch bedeutsamen Unterschiede zwischen Alpha-reichen und Alpha-armen Oszillogrammen sollten in einem brauchbaren Index in ganz verschiedenen Zahlenwerten zum Ausdruck kommen.

Mit einer vierten Methode haben WILLIAMS und REYNELL versucht, sowohl die Amplitude wie die Häufigkeit der Alpha-Wellen zu erfassen. Sie berechnen das Produkt der Amplitude und der Zahl der Alpha-Wellen und werten Seitendifferenzen von 20% oder mehr auf einer Seite als abnorm. Doch haben sie diesen Index nicht systematisch durchgeführt und die Alpha-Verminderung im allgemeinen mit freiem Auge bestimmt.

Aus dem Gesagten ergeben sich die Forderungen, die an einen Index gestellt werden müssen, damit er zahlenmäßig dem Kurvenverlauf möglichst gerecht wird und dabei die biologisch wichtigsten Merkmale erfaßt:

1. Die charakteristischsten Schwankungen des EEG sind zweifellos die Alpha-Wellen; sie sind — nach unserem gegenwärtigen Wissen — auch die biologisch interessantesten, außerdem die methodisch am leichtesten erfassbaren. Ein brauchbarer Index muß daher in erster Linie die Alpha-Wellen berücksichtigen (dies trifft auf den DAVIS-Index zu, nicht aber auf den HOAGLAND- und HOECHLER-Index).

2. Der Index muß vergleichbare Werte liefern; d. h. er muß, auf jedes EEG angewandt, zu einer Zahl führen, die mit den auf gleiche Weise gewonnenen Zahlen aus den EEGs anderer Personen fehlerlos verglichen werden kann. Dies trifft auf den HOAGLAND-, auf den HOECHEL- und auf den DAVIS-Index zu.

3. Er muß die Größe der auftretenden Spannungen enthalten (was im DAVIS-Index überhaupt nicht, im HOAGLAND-Index nur für die Delta-Wellen, im HOECHEL-Index nur für die größten jeweils auftretenden Spannungen ohne Rücksicht auf die Art der Wellen geschieht).

4. Er muß für alle Verstärkungen und Papiergeschwindigkeiten, beginnend bei einer für alle gehirnelektrischen Untersuchungen prinzipiell zu fordernden Minimalverstärkung und -geschwindigkeit anwendbar sein (was für den DAVIS- und den HOECHEL-Index, nicht aber für den HOAGLAND-Index zutrifft. HOECHEL legt seinem Index jedoch eine viel zu hohe Normalspannung — 100 Mikrovolt — zugrunde)*.

5. Er muß sich auf sicher und leicht auszählbare Daten stützen und einfach errechenbar sein.

Nach vielerlei Versuchen mit verschiedenen Rechnungsweisen hat sich folgendes Verfahren als das beste erwiesen: es wird von einem mindestens 1 min langen Oszillogramm das Alpha-reichste Stück von 10 sec Dauer herausgesucht, die Anzahl der Alpha-Wellen festgestellt und durch die Durchschnittsfrequenz dividiert. Die Formel lautet also:

$$\frac{\text{Alpha-Wellen in } 10 \text{ sec}}{\text{Frequenz.}}$$

Die Notwendigkeit, die Alpha-Zahl durch die Frequenz zu teilen, läßt sich leicht aufzeigen: ist z. B. die Anzahl der Alpha-Wellen in 10 sec 86, so bedeutet dies bei einer Frequenz von 12 Hz eine viel geringere Häufung (das Maximum bei einer Frequenz von 12 in 10 sec wäre ja 120) als bei einer Frequenz von 9, bei welcher die Anzahl von 86 schon fast das Maximum, nämlich 90, darstellt. Erst durch die Division mit der Frequenz werden die Oszillogramme verschiedener Personen mit verschiedenen Alpha-Frequenzen vergleichbar; die bloße Zahl der Alpha-

* Die Maximalspannung der Alpha-Wellen ist bei den meisten Menschen viel geringer als 100 Mikrovolt.

Wellen sagt noch gar nichts über den Alpha-Reichtum oder die Alpha-Armut einer Kurve aus.

Der Index wird noch handlicher und praktischer, wenn man den Zähler mit 10 multipliziert, also die Formel:

$$\frac{\text{Anzahl der Alphawellen in } 10 \text{ sec} \cdot 10}{\text{Frequenz}}$$

verwendet. Dadurch ergibt sich nämlich als höchstmögliche Maximum bei jeder Frequenz immer 100. Beispiel: Frequenz 12, in 10 sec 120 Alpha-Wellen, also $120 \cdot 10/12 = 100$. Die Zahl 100 als höchstmöglicher Indexwert ist unabhängig von der Frequenz, dabei aber doch in gleicher Weise für alle vorkommenden Frequenzen gültig; dieser Umstand macht den Index bis zu einem gewissen Grad anschaulich und erleichtert dadurch die Beurteilung der Zahlenwerte. Je näher der Wert bei 100 liegt, desto größer war die Anzahl der Alpha-Wellen im Alpha-reichsten Stück des Oszillogramms.

Hat man nur ein einzelnes EEG zu beurteilen, so bereitet die Auffindung des Alpha-reichsten Kurvenstückes von 10 sec Länge im allgemeinen keine Schwierigkeiten. Hat man mehrere gleichzeitige Ableitungen von verschiedenen Stellen des Kopfes durchgeführt, so daß 2 oder 3 Kurvenzüge auf dem Papierfilm untereinanderliegen, so darf man natürlich nicht bei jedem das Alpha-reichste Stück heraussuchen, sondern muß untereinander stehende, gleichzeitige Kurvenstücke von 10 sec Dauer wählen, weil es ja auf den Vergleich der Prozesse ankommt, die sich in denselben 10 sec in verschiedenen Hirnpartien abgespielt haben. Es ist nicht schwer, bei solchen Oszillogrammen mit mehreren Kurvenzügen eine Stelle zu finden, in welcher in allen gleichzeitigen Ableitungen die meisten Alpha-Wellen vorhanden waren; sollte dies nicht gelingen (was bei meinen Aufnahmen bisher nie vorkam), so müßte man dies im Befund vermerken und 2 Auswertungen derselben Aufnahme durchführen, um daraus einen Mittelwert zu gewinnen.

Der beschriebene Index erfüllt alle oben aufgestellten Forderungen. Seine Berechnung bereitet auch einer Hilfskraft, die von Elektroencephalographie gar nichts versteht, keinerlei Schwierigkeiten. Die Erfahrung hat gezeigt, daß er auch die wichtigste Aufgabe, die ein Index lösen soll, in ausreichendem Maße erfüllt; er streut im Bereich von 0 bis 100, ist also fein genug, um den Alpha-Gehalt eines Oszillogramms in genügender Treue zahlenmäßig zu erfassen. Seitendifferenzen bei einseitigen Krankheitsherden sowie Verteilungsstörungen von den occipitalen zu den frontalen Regionen kommen deutlich und klar zum Ausdruck. Beim Gesunden scheinen die Indexdifferenzen zwischen Ableitungen von analogen Stellen der rechten und linken Hemisphäre den Wert 3 nicht zu überschreiten, bei einseitig Geschädigten betragen sie nach meinen bisherigen Erfahrungen 15 und mehr.

Auf die Beta-Wellen, die bisher durch keinen Index erfaßt wurden, ist er in analoger Weise anwendbar; doch müssen die Aufnahmen wegen der höheren Frequenz mit größerer Geschwindigkeit (mindestens 6 cm pro Sekunde) gemacht werden. Die Delta-Wellen sind so charakteristisch und in ihrer symptomatischen Bedeutung so umstritten, daß sich ein Index erübriggt; da sie nur bei krankhaften Prozessen auftreten, genügt im Befund der Vermerk: Delta-Wellen.

Um auch die Größe der auftretenden Spannungen zu berücksichtigen, habe ich zunächst einen Mittelwert der Spannung im 10 sec-Stück errechnet und mit ihm den Index multipliziert. Dieses Vorgehen hat aber, da die Spannungen bei verschiedenen Menschen außerordentlich stark variieren, die Indices so stark verändert, daß daraus ein eindeutiger Eindruck über den Reichtum an Alpha-Wellen nicht zu gewinnen war. Dazu kommt, daß die biologische Bedeutung der Spannungsgröße noch fraglich ist, weil dabei die Dicke des Schädelknochens sowie der jeweilige Hautwiderstand eine wesentliche Rolle spielen können. Ich habe daher den Mittelwert der Spannung, der sich bei einiger Übung leicht durch Ausmessen einer mittelgroßen Amplitude im 10 sec-Stück feststellen läßt, einfach neben den Index geschrieben.

Ein Beispiel für die Berechnung: aus dem ganzen Oszillogramm wird diejenige Stelle herausgesucht, die auf einer Länge von 10 sec am meisten Alpha-Wellen enthält; bei mehreren gleichzeitigen Kurven wird die Stelle gesucht, an welcher durch 10 sec alle Kurven die meisten Alpha-Wellen aufweisen. Die Länge von 10 sec, am Zeitzeichen gemessen, wird mit Strichen abgegrenzt, dann werden die Alpha-Wellen (und zwar auch die kleinsten, gerade noch erkennbaren) gezählt. Diese Zählung ergebe z. B. 60 Alpha-Wellen, nun wird im gleichen Stück an Hand der Zeitmarke die Frequenz, also die Anzahl der Alpha-Wellen pro Sekunde festgestellt, was sich ohne Schwierigkeiten auch dann machen läßt, wenn so wenig Alpha-Wellen aufgetreten sind, daß sie nie 1 sec lang ununterbrochen vorhanden sind (dann muß man die Frequenz an einer halben oder Drittelsekunde errechnen). Die Anzahl wird durch die Frequenz dividiert; ist die Frequenz 9, so ergibt sich im obigen Beispiel $60/9 = 6,6$; diese Zahl mit 10 multipliziert ergibt den Index 66. Die Bezugszahl, nämlich das Maximum, wäre wie bei jeder anderen Frequenz 100 (nämlich bei Frequenz 9 in 10 sec 90 Alphawellen, also $\frac{90 \cdot 10}{9}$).

Dann wird die Spannung errechnet. Aus der Verstärkung und der Empfindlichkeit des Oszillographen sowie der Verstärkungskurve ergibt sich für den Bereich von 8—12 Hz ein bestimmter Wert pro Millimeter Amplitude (z. B. 1,3 Mikrovolt pro Millimeter). Aus dem 10 sec-Stück wird eine eindrucksmäßig mittelgroße Alpha-Amplitude von Spitze zu Spitze gemessen und ihre Länge, z. B. 12 mm mit dem oben erwähnten

Wert multipliziert (also $12 \cdot 1,3 = 15,6$). Die mittlere Spannung beträgt dann 15,6 Mikrovolt Effektivspannung. Dieser Wert wird neben den Index geschrieben; im Beispiel lautet also der Gesamtindex: 66/15,6.

Um einen Eindruck von den Zahlenwerten zu vermitteln, die sich bei Gesunden und Hirnverletzten nach dem beschriebenen Index ergeben, sind in Tab. 1 die Indexwerte von 3 gesunden Versuchspersonen (davon die beiden ersten auch im Ermüdungszustand) denjenigen von 5 Hirnverletzten gegenübergestellt. Es handelt sich dabei um gleichzeitige Ableitungen von analogen Stellen der rechten und linken Schädelseite gegen die an der geerdeten Elektrode liegenden Ohrläppchen. Man beachte die hohen frontalen Indexwerte bei Ermüdung und bei den ersten vier Hirnverletzten.

Tabelle 1.

	Gesunde				Hirnverletzte					
	Normalzustand		ermüdet	stark ermüdet						
occ. re... .	76/11	44/5	55/9	87/9	68/17	92/13	87/11	67/10	88/10	64/9
occ. li... .	77/10	47/6	56/8	88/9	66/15	87/14	84/9	76/11	76/9	43/8
praeccentr. re.	68/9	60/8	44/7	73/9	74/13	84/8	77/14	70/10	51/11	30/7
praeccentr. li.	65/8	60/9	45/8	70/10	76/16	90/9	80/11	71/13	55/10	37/7
frontal re. .	42/7	22/4	38/7	63/8	61/9	55/5	78/11	66/9	76/8	15/8
frontal li... .	40/7	20/5	36/7	60/8	62/11	72/6	86/12	73/10	72/8	23/7

Zusammenfassung.

Nach kritischer Besprechung der Vorteile und Nachteile der Indices von DAVIS, HOAGLAND und HOECHEL und nach Aufstellung der Forderungen, die ein brauchbarer Index erfüllen muß, wird ein neuer Index:

$$\frac{\text{Alpha-Wellen in } 10 \text{ sec} \cdot 10}{\text{Frequenz}}$$

vorgeschlagen. Dieser Index ist auf genau feststellbaren Daten aufgebaut und vermittelt einen verlässlichen Eindruck von der Häufigkeit der Alpha-Wellen; je näher der Indexwert bei 100 liegt, desto größer ist die Alpha-Produktion. An Beispielen wird gezeigt, daß er genügend stark streut. Die Größe der auftretenden Spannung wird an einer mittelgroßen Alpha-Welle bestimmt und zur Indexzahl einfach hinzugeschrieben.

Literatur.

- ¹ DAVIS, H., u. P. A. DAVIS: Arch. of Neur. **36**, 1214 (1936). — ² HOAGLAND, H. M., M. A. RUBIN, and D. A. CAMERON: Amer. J. Physiol. **120**, 559 (1937). — ³ HOECHEL, G.: Z. Neur. **174**, 281 (1942). — ⁴ WILLIAMS, D., and J. REYNELL: Brain **68**, 123 (1945).