Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 3

Artikel: Messung elektrischer Potentiale am Auge : die Elektroretinographie liefert Informationen von der Netzhaut

Autor: Niemeyer, Günter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-901908

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Messung elektrischer Potentiale am Auge

Die Elektroretinographie liefert Informationen von der Netzhaut

Mit speziellen Kontaktlinsenelektroden misst die Elektroretinographie elektrische Potentiale, die sich von der Netzhaut durch den Glaskörper des Auges bis zur Hornhaut des Auges fortpflanzen. Diese Technik lässt Rückschlüsse auf die Aktivität der Netzhaut zu und kann zur frühzeitigen Erkennung degenerativer Erkrankungen eingesetzt werden.

Elektrische Signale im Nervensystem

Information wird im Nervensystem in Form sogenannter elektrochemischer Aktionspotentiale von einer Nervenzelle zur nachgeschalteten Nervenzelle weitergeleitet. Entlang einer Nervenfaser breitet sich ein Signalpuls als lokale, von der Verteilung von Natrium- und Kaliumionen erzeugte elektrische Polarisierung der Zellwand aus. Wenn ein derartiger Puls das Ende der Faser erreicht, wird er durch Ausschüttung chemischer Überträgerstoffe (Neurotransmittoren) auf die nächste Nervenzelle übertragen, wo sich sodann ein neues Aktionspotential ausbildet. Diese Art der Signalausbreitung findet zwischen den Nervenzellen im Gehirn, im Rückenmark, im Innenohr und auch in der Netzhaut statt. Vereinfacht zusammengefasst, kann die Informationsverarbeitung des Nervensystems als eine durch äussere und innere Reize ausgelöste Änderung des Gleichgewichtszustandes der Gehirnaktivität verstanden werden. Dies gilt auch für Seheindrücke (visuelle Reize).

Einige Worte zur Anatomie der Netzhaut: Der Aufbau der Netzhaut ist bei allen Wirbeltieren sehr ähnlich. Im folgenden spreche ich nur von der Netzhaut des Säugetiers einschliesslich des menschlichen Auges (Bild 1). Die Netzhaut (Retina) als Teil des zentralen Nervensystems ist spezialisiert auf die Erkennung von Lichtsignalen. Alle Lichtsignale sind letztlich Änderungen der Intensität und der Wellenlänge (Farbton) der elektromagnetischen Wellen im sichtbaren Spektralbereich. Nur zwei Typen von Zellen sind für die Aufnahme des Lichtes geeignet: die lichtempfindlichen Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut. Die Stäbchen-Photorezeptoren vermitteln Helligkeitsunterschiede, aber keine Farbinformation. Sie enthalten das lichtempfindliche Pigment Sehpurpur (Rhodopsin). Ihre Lichtempfindlichkeit ist praktisch vergleichbar mit den besten technischen Photodetektoren. Die Zapfen-Photorezeptoren sind zwar weniger empfindlich, ermöglichen aber Farbensehen und eine hohe Auflösung von Sehzeichen, zum Beispiel beim Lesen kleiner Schrift. Beim Menschen sind drei verschiedene Zapfen-Photorezeptoren mit unterschiedlichen Sehfarbstoffen in «Teamarbeit» für das Erkennen von Farben Voraussetzung. Die beiden Klassen Stäbchen und Zapfen arbeiten in unterschiedlichen Helligkeitsbereichen. Dies ermöglicht, dass wir unsere Umgebung sowohl bei geringster Lichtstärke in einer Nacht mit bewölktem Himmel als auch in hellstem Sonnenlicht erkennen können. Dabei kann die Lichtintensität über insgesamt elf logarithmische Einheiten variieren. Diese erstaunliche Anpassung des dynamischen Bereiches unseres Sehorganes an die Umgebungshelligkeit wird als Hell- bzw. Dunkeladaptation bezeichnet. Jeder hat schon beobachtet, dass die Anpassung an eine helle Umgebung Sekunden bis Minuten dauert, während die Anpassung an Dunkelheit (Empfindlichkeitssteigerung) bis zu 30 Minuten benötigen kann. Die Nervenzellen haben im Prinzip drei Möglichkeiten, auf eine Reizung zu reagieren: Sie depolarisieren oder hyperpolarisieren das Membranpotential solange ein Lichtreiz andauert, oder es werden etwa 1 ms kurze Pulse in einer zur Reizstärke proportionalen Frequenz erzeugt (siehe auch den Artikel von Jörg Kramer ab Seite 19). In Dunkelheit und bei gleichbleibender Umgebungsbeleuchtung besteht eine spontane Aktivität («Rauschen») in der Netzhaut, ein im Mittel gleichmässiges Muster von Pulsen. Diese Pulse der Ganglienzellen der Netzhaut (Zellen auf der Glaskörperseite der Netzhaut) werden als Spikes bezeichnet. Es sind Muster von Spikefrequenzen, die Erregung, Hemmung und Anpassung ausdrücken und damit alle visuelle Information aus der Umwelt über den Sehnerv entlang der höheren Sehbahn den Sehzentren des Gehirns zuführen. Diese Leitung (Sehnerv) enthält eine Million isolierter Mikrokabel.

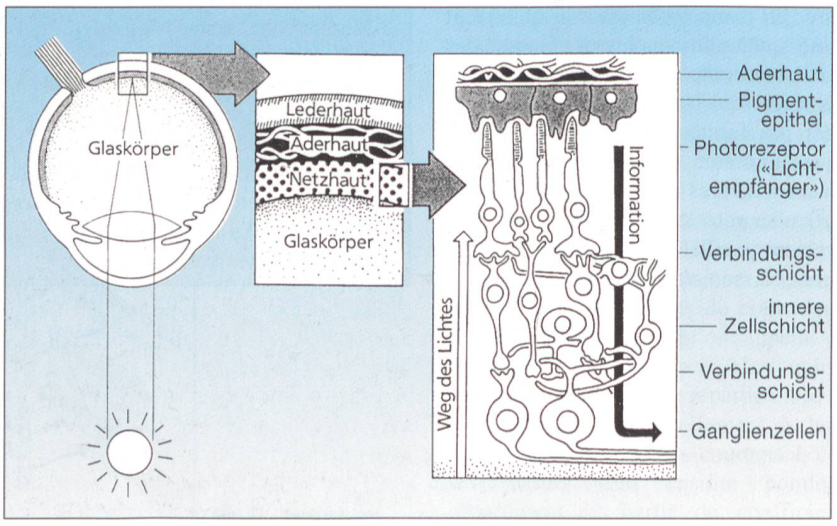

Bild 1 Weg des Lichtes im Auge und Netzhautanatomie (rechte Seite)

Adresse des Autors
Prof. Dr. med. *Günter Niemeyer*
Universitäts-Augenklinik Zürich
Neurophysiologie-Labor, 8091 Zürich
E-Mail niemeyer@opht.unizh.ch

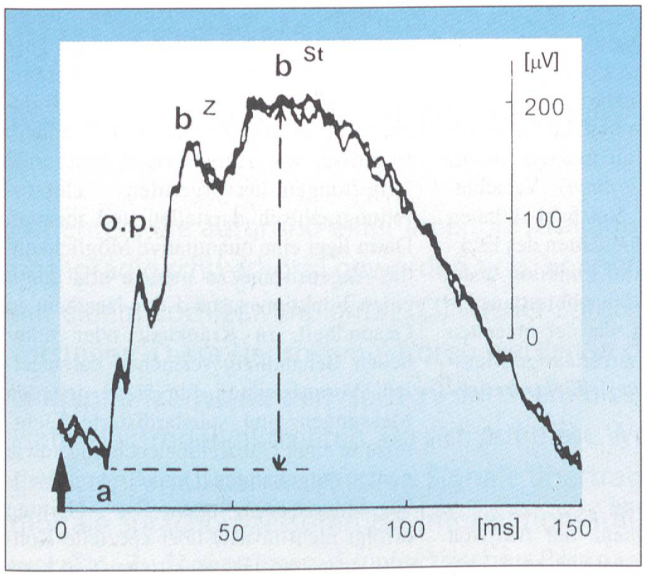

Bild 2 Normale elektrische Antwort des Auges auf roten Lichtblitz

o.p. = Oszillatorische Potentiale; a = a-Welle, b = b-Welle, Z = Zapfen, St = Stäbchen; nach oben gerichteter schwarzer Pfeil: Lichtblitz

Augenstrombild und Feldpotentiale

Von der Oberfläche des Schädels lassen sich mit aufgeklebten Elektroden die Hirnströme ableiten, man spricht vom Hirnstrombild oder Elektroenzephalogramm (EEG). Mit dieser Technik werden spontane elektrische Veränderungen im Wach- und im Schlafzustand aufgezeichnet. Diese Veränderungen werden durch Lichtblitze, durch Hell-Dunkel-Muster, durch taktile oder akustische Reize ausgelöst. Man spricht von evozierten Potentialen. Auf der Oberfläche des Schädels erscheinen die Gehirnströme als lokale elektrische Änderungen, als sogenannte *Feldpotentiale*. Diese Potentiale besitzen in Abhängigkeit von der Gehirnaktivität charakteristische Verteilungen und Ausbreitungsmuster, die mit Hilfe eines Elektroenzephalogramms registriert werden können. Auch im Auge werden nach Erregung der vielen Millionen von Netzhaut-Nervenzellen solche Feldpotentiale ausgelöst. Diese Feldpotentiale in der etwa 0,2 mm dünnen Netzhaut breiten sich über den Glaskörper des Auges als passiven Volumenleiter bis nach vorne zur Hornhaut aus. Von dort strahlen die Feldpotentiale auch in die Umgebung des Auges wie zum Beispiel in die Lider aus. Diese durch Lichtblitze ausgelösten Augenpotentiale werden unter dem Begriff Elektroretinogramm (ERG) zusammengefasst (Bilder 2 und 3). Die aus einer Belichtung der Netzhaut resultierenden Ionenverschiebungen entlang der Zellen sind von der Hornhaut über spezielle Kontaktlinsenelektroden ableitbar (wie in Bild 2 und 3). Dieses ist eine äusserliche, nicht-invasive Untersuchung, die als Elektroretinographie diagnostisch verwendbar ist. Bei der Untersuchung erfolgt das «Synchronisieren» oder «Stören» durch Lichtblitze, die in Intensität, Wellenlänge und Dauer standardisiert verändert werden. So kann ein Lichtreiz nahe an der Schwelle des Sehens mit einer minimalen elektrischen Reaktion, ein wesentlich hellerer Lichtblitz und schliesslich ein sättigender Lichtreiz verwendet werden. Eine Beleuchtung des ganzen Gesichtsfeldes (Ganzfeld) und kontrollierte Dunkel- oder Helladaptation des menschlichen Auges sind Vorausssetzung für reproduzierbare Messresultate (Bild 3). Eine in der Intensität über etwa sechs logarithmische Einheiten variierende Reizstärke ergibt für die Amplitude der elektrischen Signale eine Kennlinie. Diese ist unter Berücksichtigung der interindividuellen Variabilität, des Alters und der Brechkraft des Auges ein sehr gutes Mass für die Funktion der menschlichen Netzhaut. Diese Messungen haben eine grosse klinische Bedeutung gewonnen, besonders in der Diagnostik von Erbkrankheiten der menschlichen Netzhaut.

Elektroretinographie als klinisch-diagnostisches Verfahren

Elektroretinogramme lassen sich bereits beim Säugling und Kleinkind zusammen mit anderen Augenuntersuchungen in kurzer allgemeiner Anästhesie ableiten. Mit diesem Aufwand können wichtige Sehstörungen früh erkannt werden. So können wir totale Farbenblindheit mit begleitendem Augenzittern (Nystagmus), erbliche Nachtblindheit und schliesslich erbliche, fortschreitende Netzhautdegeneration an typischen ERG-Mustern erkennen. Natürlich ist die Möglichkeit früher diagnostischer Entscheidungen wichtig für die Beratung der Eltern erkrankter Kinder und auch für eine angepasste Förderung, Erziehung und Ausbildung.

Netzhautdegenerationen (*Retinitis pigmentosa*, erbliche *Macula-Degeneration*, fortschreitende *Dystrophie* des Zapfen-

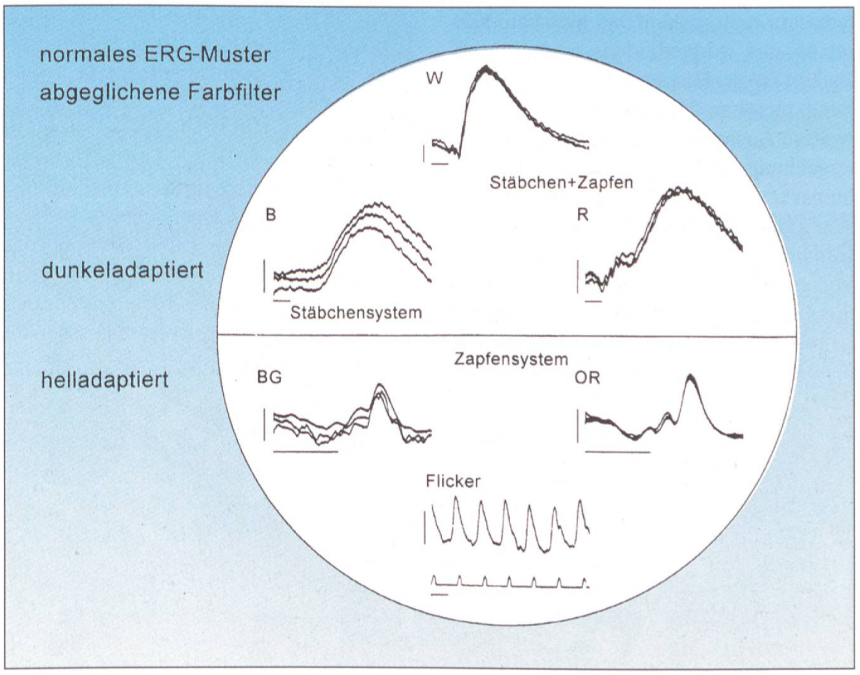

Bild 3 Typische Elektroretinogramme des Menschen in Dunkel- (obere Hälfte) und in Helladaptation

Stäbchen- und Zapfenapparate der Netzhaut generieren unterschiedliche und charakteristische Signale. Unten ist das Elektroretinogramm bei 30-Hz-Stimulation aufgezeichnet (darunter Photozellen-Signale). Buchstaben bezeichnen Lichtreize unterschiedlicher Farbe: B blau, BG blaugrün, OR orange, R rot, W weiss. Kalibration senkrecht 50 µVolt, horizontal 20 ms.

systems) treten in verschiedenen Lebensaltern auf und führen zu ganz unterschiedlichen Beschwerden. Augenärztliche Untersuchungen und Elektroretinographie führen schliesslich zur Diagnose. Hier besteht eine ausserordentliche genetische Vielfalt: Sie spiegelt sich in über hundert verschiedenen Mutationen des menschlichen Erbmaterials, die sich am Auge ausdrücken. Zudem besteht auch eine ausserordentliche Variabilität des klinischen Erscheinungsbildes, das heisst der Zeitpunkt des Auftretens der ersten Symptome wie schlechtes Sehen in der Dämmerung bis zu völliger Nachtblindheit, Einschränkung des Gesichtsfeldes mit Ausfällen von den Seiten her oder im Zentrum und Verminderung der Sehschärfe und der Lesefähigkeit kann individuell sehr unterschiedlich sein. Beschwerden können sich vom Kleinkindesalter bis etwa zur fünften Lebensdekade erstmals bemerkbar machen. Zudem werden ganz unterschiedliche Progressionsraten der Netzhautdegeneration beobachtet. Sogar innerhalb der gleichen Familie variieren Art und Rate des Fortschreitens der subjektiven und messbaren Verschlechterung des Sehens. Dieser Sachverhalt erschwert natürlich eine ärztliche Beratung und Prognosestellung.

In diesen Veränderungen der Sehfähigkeit, ihrer Diagnostik als Grundlage der ärztlichen und genetischen Beratung spielt die elektrische Augenuntersuchung eine besondere Rolle: mit der Elektroretinographie können wir *objektive,* das heisst reproduzierbare und messbare Korrelate des Augenleidens aufzeichnen. Zudem ist das Fortschreiten einer Erkrankung messbar. Hieraus ergibt sich eine weitere Anwendung der elektrischen Untersuchung am Auge: Werden Behandlungsversuche auf Grund neuester Forschungserkenntnisse in Tiermodellen für Netzhautdegenerationen oder auch erste Versuche einer Behandlung an Menschen durchgeführt, so gilt es den Verlauf der Krankheit bzw. die Wirkung einer Behandlung genauestens zu dokumentieren. Gesichtsfeldbestimmungen, Messen der Sehschärfe und Dokumentieren des Elektroretinogramms sind hier die wichtigsten Parameter. Neue Verfahren ermöglichen auch von ganz kleinen Netzhautgebieten elektrische Korrelate zu messen *(multifokales Elektroretinogramm).* Verschiedene Schichten der Netzhaut können durch bestimmte Komponenten des Elektroretinogramms in ihrer Funktion überprüft werden. Durch Schachbrettmusterreize lassen sich auch von der innersten Schicht der Netzhaut zuverlässige Messresultate ableiten *(Pattern-Elektroretinogramm).*

Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Elektrische Phänomene der Aktivität des zentralen Nervensystems sind vom Enzephalogramm und in der Herzdiagnostik vom Elektrokardiogramm bekannt. Entsprechende elektrische Aktivität entsteht auch bei Belichtung der Netzhaut des Auges. Das Elektroretinogramm widerspiegelt die Funktion der Netzhaut und erlaubt damit diagnostische Rückschlüsse. In der modernen Augenheilkunde lassen sich Störungen der Netzhautfunktion – durch angeborene, durch später auftretende vererbte Netzhautdegenerationen oder durch andere Einflüsse, wie zum Beispiel bestimmte Vergiftungen hervorgerufen – elektroretinographisch darstellen und messen. Darin liegt eine quantitative Möglichkeit, die Augenströme zu messen und damit einen Funktionszustand der Netzhaut in Gesundheit, in Krankheit oder unter neuen Behandlungsversuchen darzustellen. Voraussetzung für diese genauen Messungen sind standardisierte Lichtreize in einer Ganzfeldbeleuchtung sowie genau eingehaltene Dunkel- und Helladaptationsbedingungen. Die Ableitung erfolgt nicht-invasiv über spezielle Kontaktlinsen und Hautelektroden. Sie kann auch in kurzer allgemeiner Anästhesie bei Säuglingen und Kleinkindern zusammen mit anderen Augenuntersuchungen durchgeführt werden. Die ERG-Untersuchungen bilden eine diagnostische Möglichkeit, die die Beratung von Patienten oder deren Eltern erleichtert.

Electrorétinographie

Les phénomènes électriques de l'activité du système nerveux central (électroencéphalographie) et du diagnostic cardiaque (électrocardiographie) sont connus. Une activité électrique correspondante est produite lors de l'illumination de la rétine de l'œil. L'électrorétinographie reflète la fonction de la rétine et permet donc des conclusions diagnostiques. L'ophtalmologie contemporaine rend possible la représentation et la mesure des dysfonctions de la rétine, soit héréditaires (se manifestant dès la naissance ou plus tard) ou provoquées par des influences extérieures. Ainsi existe-t-il une méthode de quantifier les courants électriques dans l'œil et de mesurer l'état fonctionnel de la rétine saine ou malade, avec ou sans thérapie. Des analyses exactes exigent la standardisation de l'intensité de la lumière utilisée ainsi qu'un respect rigoureux des conditions de l'adaptation à la lumière et à l'obscurité. L'enregistrement se réalise de façon non-invasive avec des lentilles de contact spécialisées et des électrodes cutanées. Il s'applique aussi bien pour des nourrissons et des petits enfants par une brève anesthésie générale. L'électrorétinographie représente une possibilité diagnostique qui facilite de conseiller les patients ou leurs parents.

Der SEV auf dem Internet / L'ASE sur l'Internet:
http://www.sev.ch