

Verfahren zur on-line-Minimierung von Lidschlag- und vertikalen Augenbewegungsartefakten im EEG

J. Schwind, M. Gross

Institut für Physiologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena

On-line removal of eyelid and vertical eye movement artifacts of the EEG

The analysis of electroencephalograms and event-related potentials may be difficult by the presence of eyelid and eye movement artifacts. In this paper a method is described, which allows a relatively simple on-line correction of vertical ocular activity, measurable by electrooculogram, in several EEG channels. Eyelid and eye movement artifacts are being manifest in a different extension at a different EEG recording position.

Using the electrooculogram, with the aid of a simple electronic device it is possible to differ between eyelid and eye movement artifacts, which will be corrected selectively. If only midline derivations are evaluated (Fz, Cz, Pz) the vertical EOG is sufficient and horizontal EOG may be left out from the correcting procedure. The efficiency of the procedure is proved by EEG and ERP records.

Key words: *Electroencephalogram – Event-related potentials – Eyelid and eye movement artifacts – On-line EOG correcting procedure*

Zusammenfassung

Die Analyse von Elektroenzephalogrammen und ereignisbezogenen Potentialen kann durch Lidschlag- und Augenbewegungsartefakten wesentlich erschwert werden. In diesem Artikel wird ein on-line Verfahren beschrieben, das eine relativ einfache Korrektur der vertikalen Augenaktivität, die mit Hilfe des Elektrookulogramms meßbar ist, an mehreren EEG-Ableitungen erlaubt. Lidschlag- und Augenbewegungsartefakte manifestieren sich in unterschiedlicher Ausprägung an einer jeweiligen EEG-Ableitposition.

Mit Hilfe einer einfachen elektronischen Schaltungsanordnung kann anhand der EOG-Aktivität zwischen Lidschlag- und Augenbewegungsartefakten unterschieden werden, die dann selektiv korrigiert werden können. Werden nur EEG-Ableitungen von der Mittellinie benutzt, kann auf die Korrektur des horizontalen EOG verzichtet werden. Die Effizienz des Verfahrens wird durch EEG- und ERP-Ableitbeispiele nachgewiesen.

EEG-Ableitungen können von einer ganzen Reihe technischer und biologischer Artefakte beeinflusst werden, deren Beseitigung bzw. Minimierung Voraussetzung für eine reliable EEG-Analyse ist. Eine Hauptquelle biologischer Artefakte bei EEG-Registrierungen und bei der Analyse ereignisbezogener Potentiale sind Lidschläge und Augenbewegungen.

Das Auge stellt einen elektrischen Dipol dar. Dessen Minuspol befindet sich am Augenhintergrund und der positive Pol an der Kornea. Das elektrische Feld dieses Dipols breitet sich über den gesamten Schädelbereich aus, wobei die Intensität des Dipolfeldes mit dem Quadrat der Entfernung vom Auge abnimmt. Ändert dieses Dipolfeld seine Richtung bei Bewegungen des Auges bzw. bei Lidschlägen, so wird die Änderung des korneo-retinalen Bestandpotentials an den verschiedenen Ableitstellen des EEG an der Schädeloberfläche in unterschiedlichem Ausmaß zu den Potentialen summiert, die von den intrakraniellen Generatoren stammen. Darüber hinaus muß berücksichtigt werden, daß Lidschläge und Augenbewegungen unterschiedliche Felder generieren, die damit auch die EEG-Ableitungen unterschiedlich beeinflussen.

Vor allem psychophysiologische Untersuchungen erfordern eine EEG-Ableitung bei geöffneten Augen. Dabei kommt es natürlicherweise zu Bewegungen der Augen und zu Lidschlägen; auch sind bestimmte Personengruppen, z. B. Kinder und psychiatrische Patienten, häufig nicht in der Lage, ihre Augen-

aktivität willkürlich gering zu halten. Dann ist es schwierig, eine zeitlich länger zusammenhängende störungsfreie EEG-Registrierung oder genügend artefaktfreie EEG-Abschnitte für die Mittelung ereignisbezogener Potentiale zu erhalten.

Psychophysiologische Untersuchungen sind in der Regel so gestaltet, daß die Bewältigung der Anforderungen des Experiments Augenbewegungen erfordert, wodurch das Vorhandensein ungestörter Registrierungen von vornherein gar nicht möglich ist, z. B. bei Betrachten bestimmter Items, die dem Probanden per Dia oder Videodisplay dargeboten werden. Andererseits ist die Untersuchung oftmals mit der Instruktion an die Probanden verbunden, die Augen während der Untersuchung nicht zu bewegen oder Lidschläge und Augenbewegungen auf Zeiten zu beschränken, in denen das Experiment keine Anforderungen stellt. Diese Anweisungen können jedoch zu einer „Zweitbeschäftigung“ der Versuchsperson und zu einer Teilung der Aufmerksamkeit zwischen den eigentlichen experimentellen Aufgaben und der Beobachtung der eigenen Augenaktivität führen. Das könnte die Untersuchungsergebnisse erheblich beeinflussen.

Im folgenden wird eine Methode zur Korrektur von Lidschlag- und Augenbewegungsartefakten im EEG beschrieben, die seit einigen Jahren bei der Analyse ereigniskorrelierter Potentiale erfolgreich eingesetzt wird und folgenden Anforderungen gerecht wird:

1. Das Verfahren erhöht die „Ausbeute“ analysefähiger EEG-Abschnitte *wesentlich*.
2. Da die Verteilung der EOG-Artefakte über der Schädeloberfläche intra- und interindividuellen Unterschieden anatomischer Art unterliegen, wird die *Korrekturgröße für jedes Individuum und für jede EEG-Ableitelektrode separat bestimmt*.
3. Das Verfahren unterscheidet nach bestimmten Kriterien selbständig zwischen Lidschlag- und Augenbewegungsartefakten. Damit ist eine *optimale Korrektur* beider Artefakte möglich.
4. Bewußt intendierte Lidschläge und Augenbewegungen unterscheiden sich in ihrer EOG-Repräsentation in der Regel von unbewußten, z. B. während der Untersuchung. Deshalb ist es notwendig, die *Bestimmung der Korrekturfaktoren aus Daten des Untersuchungszeitraumes* und nicht einer vorexperimentellen Phase vorzunehmen.
5. Das Korrekturverfahren beinhaltet die Möglichkeit zum Gebrauch von *adaptiven, zeitvariablen Korrekturfaktoren*, für den Fall, daß das Übertragungsverhalten des EOG zeitabhängig ist.
6. Gleichzeitig vorhandene ereignisbezogene EOG- und EEG-Aktivität führt nicht zu einer fehlerhaften Korrektur der ereigniskorrelierten Potentiale.

Methodik und Gerätekonzeption

Um ein exaktes elektrisches Abbild der Augenaktivität zu erhalten, ist es erforderlich, eine Spannung zu erzeugen, die eine möglichst genaue Darstellung der physikalischen Position des Auges ermöglicht.

Dieser Forderung entspricht das Elektrookulogramm sehr gut, da die abgeleitete EOG-Spannung in einem engen Zusammenhang mit der Arbeitsweise der Bewegungsspannungsgeneratoren steht. Unter Annahme eines linearen Übertragungsverhaltens, wobei die Gewebsschichten der Hirnschale und der Schädeloberfläche als ohmsche Leiter berücksichtigt werden, ist durch ein Paar orthogonaler EEG-Ableitungen in der Nähe der Augen eine vollständige Information über deren Lage in der x-y-Betrachtungsebene möglich. Somit erhält man mittels einer vertikalen und einer horizontalen bipolaren EOG-Ableitung ein sehr genaues Abbild der Augenposition und damit der Lage des elektrischen Augendipols.

Alle bisher beschriebeneri Artefakt-Minimierungsprozeduren beruhen auf der Korrektur des abgeleiteten EEG von der Augenaktivität und basieren auf der Annahme, daß das abgeleitete Oberflächenpotential durch eine lineare Addition von EEG und übertragenem EOG gegeben ist. Durch Subtraktion des gewichteten EOG vom abgeleiteten Oberflächenpotential erhält man das ungestörte EEG.

Diese Konzeption eines linearen Modells mit rein reellem Übertragungsverhalten, auf dem alle Korrekturmethode im Zeitbereich beruhen, kann wie folgt vereinfacht beschrieben werden:

$$EEG_i(t) = wEEG_i(t) + k_{ih} \times hEOG(t) + k_{iv} \times vEOG(t) \quad (1)$$

$EEG_i(t)$ = abgeleitetes (gestörtes) EEG an der i-ten Elektrode
 $wEEG_i(t)$ = wahres EEG an der i-ten Elektrode
 $hEOG(t), vEOG(t)$ = horizontales, vertikales EOG
 k_{ih}, k_{iv} = Übertragungsfaktor bzw. Korrekturfaktor an der i-ten Elektrode für horizontales bzw. vertikales EOG
 t = Beobachtungszeitpunkt

Für diese Form der Beschreibung ist es charakteristisch, daß alle Potentialverläufe, wie beobachtetes EEG, EOG und wahres EEG zeitabhängig sind, während das Koppelglied, d. h. der Übertragungsfaktor als zeitunabhängig und somit rein reell dargestellt wird. Damit wird das Verhalten eines reellen Ohmschen Dämpfungsglieds (P-Gliedes) ohne Phasenbeeinflussung des zu übertragenden Signals modelliert. Diese Annahme stellt eine Vereinfachung des tatsächlichen Sachverhaltes dar, denn Gewebsschichten weisen immer Phasen- und Amplitudengang beeinflussendes Gesamtübertragungsverhalten auf. Die Korrektur des gestörten EEG-Signals erfolgt im Zeitbereich dadurch, daß der Artefakt $k_i \times EOG(t)$ aus (1) von $EEG(t)$ subtrahiert wird, um den Anteil des wahren EEG zu erhalten.

Da sich die elektrische Augenaktivität nach Volumenbedingungen über der Hirnschale ausbreitet, variiert die Amplitude des EOG über der Schädeloberfläche beträchtlich. Deshalb ist für jede EEG-Ableitelektrode ein spezifischer Übertragungsfaktor zu bestimmen.

Für die Bestimmung der k_i bestehen grundsätzlich zwei Wege:

1. Berechnung des Regressionskoeffizienten vom EOG auf das gestörte EEG.
2. Schätzung des Einflusses des EOG an jeder EEG-Ableitelektrode und Optimierung der Korrektur durch visuellen Vergleich des abgeleiteten, gestörten EEG mit dem korrigierten (wahren) EEG.

Während die erste Methode nur mit Hilfe von Rechentechnik durchführbar ist, läßt sich die zweite Variante mit relativ geringem Aufwand in jedem – auch nicht rechnergestützten – EEG-Labor realisieren.

Das Prinzip der vorgestellten EOG-Korrektur ist in Abb. 1 für drei EEG-Kanäle und eine vertikale EOG-Ableitung dargestellt. Neu gegenüber bereits beschriebenen, vergleichbaren Verfahren (1, 2) ist die Einführung einer automatischen Lidschlag-Erkennung, da Lidschläge und Augenbewegungen mit jeweils unterschiedlichen Faktoren korrigiert werden sollten (siehe oben). Damit kann eine Über- bzw. Unterkorrektur einer der beiden Artefaktanteile vermieden werden.

Die Funktionsweise des Verfahrens beruht darauf, daß das mit dem Korrekturfaktor ($k_i = 0 \dots + 1$) multiplizierte EOG vom gestörten EEG subtrahiert wird. Die Bestimmung von k_i erfolgt bei Beginn der Untersuchung durch manuellen Abgleich und visuelle Kontrolle (z. B. auf Polygraph oder Monitor) von $EEG(t)$ und von $wEEG(t)$ solange, bis die EOG-Aktivität opti-

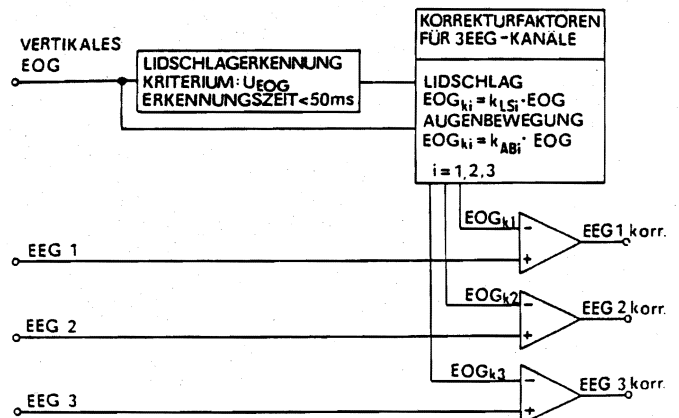


Abb. 1 Prinzipschaltbild der EOG-Artefaktkorrektur unter Verwendung des vertikalen EOG und dreier Mittellinienableitungen

mal korrigiert wird. Dabei wird für Lidschläge und Augenbewegungen ein unterschiedlicher Korrekturfaktor eingestellt.

Automatische Lidschlag-Erkennung

Zeitmessungen an unbewußten Lidschlägen verschiedener Versuchspersonen ergaben, daß diese innerhalb von 70–100 ms ihr Amplitudenmaximum erreichen und nach ca. 150–200 ms wieder auf das Ausgangspotential absinken (Messung mit DC-Verstärker). Charakteristisch für Lidschläge ist die relativ hohe Signal-Anstiegsgeschwindigkeit zu Beginn, die in der Regel auch wesentlich über der für schnelle Augenbewegungen liegt. Deshalb wurde als Erkennungskriterium der Anstieg des Signalverlaufs der Lidschläge benutzt, womit eine Echtzeitkorrektur mit nur geringer Erkennungsverzögerung ermöglicht wurde. Nach Differenzierung des EOG-Signals liegt dessen Anstiegsgeschwindigkeit direkt vor und kann dann über ein Amplitudenkriterium ausgewertet werden (Abb. 2). Über einen hochohmigen Verstärker (voltage follower) gelangt das EOG-Signal auf eine Differenzierstufe, die eine Ausgangsspannung

$$U_a(t) = -T_d \frac{dU_e(t)}{dt} \quad (2)$$

liefert. T_d ist hierbei die Differentiations-Zeitkonstante. Die besonders steil verlaufenden Lidschläge erscheinen im Ausgangssignal des Differentiators mit großer Amplitude, wodurch zur Abgrenzung vor Augenbewegungen die Anwendung eines nachfolgenden Amplitudenkriteriums möglich wird. Dieses Amplitudenkriterium wird als Schaltpegel eines Hysteresekomparators (Schmitt-Trigger) realisiert. Tritt während der Ableitung eine Augenbewegung auf, so wird der dabei generierte Augenbewegungsartefakt mit dem entsprechenden Korrekturfaktor von der EEG-Ableitung subtrahiert. Treten Lidschläge auf, so werden diese automatisch erkannt und der Korrekturfaktor wird entsprechend umgeschaltet. Die Ansprechempfindlichkeit des Schmitt-Triggers wird so eingestellt, daß der Komparator bei starken Augenbewegungen noch nicht schaltet. Die so ermittelte Schwelle erlaubt aber bereits die Erkennung kleiner Lidschläge aufgrund des steileren Flankenanstieges. Dem Komparator folgt ein monostabiler Multivibrator, der das kurzzeitige Schalten des Komparators auf eine definierte Schaltzeit von 300 ms verlängert. Der Kompromiß einer definierten Schaltzeit ist notwendig, damit

ein Lidschlag während seiner gesamten Dauer berücksichtigt wird. Zur einfachen Einstellung der Ansprechschwelle der Lidschlagenerkennung wird das Schaltsignal des Monoflops optisch und akustisch angezeigt. Gleichzeitig steuert es für jeden EEG-Kanal einen Analogschalter durch, der die Korrekturfaktoren für Augenbewegungen ab- und die für Lidschläge zuschaltet. In Abb. 3 sind die Signalverläufe innerhalb der Lidschlagenerkennung anhand einer realen EOG-Ableitung dargestellt.

Gesamtgerät

Das Gesamtgerät zur EOG-Artefaktkorrektur besteht aus den Komponenten „Lidschlagenerkennung“, „Differenzverstärker“, „Lidschlagsignalisierung“ und „Stromversorgung“. Es wurde in konventioneller Operationsverstärkertechnik für drei EEG-Kanäle und einen EOG-Kanal aufgebaut. Auf die Berücksichtigung des horizontalen EOG wurde verzichtet, da im gegebenen Einsatzfall lediglich Mittellinien-Ableitungen in Betracht kommen, an denen sich horizontale EOG-Felder im wesentlichen gegenseitig kompensieren. Die Einstellung der Korrekturfaktoren erfolgt mit sechs geeichten Potentiometern (je einen für Lidschläge und Augenbewegungen für drei EEG-Kanäle). Eine detaillierte Schaltungsbeschreibung des Gesamtgerätes liegt bei den Autoren vor.

Ergebnisse

Die Wirksamkeit der Artefakt-Minimierungsprozedur wurde anhand statistischer Verfahren geprüft (3). Darüber hinaus wurde ein Vergleich mit einer rechen-technischen Korrekturprozedur (4) angestellt, die mit Hilfe einer multiplen linearen Regression eine objektive Bestimmung der Korrekturfaktoren aus den EEG- und EOG-Daten erlaubt. Hier soll die Effizienz anhand des visuellen Vergleichs von gestörten und korrigierten EEG dargestellt werden. Als Beispiele dienen sowohl EEG-Ableitungen als auch daraus extrahierte ereignisbezogene Potentiale.

Abb. 4 zeigt die Anwendung des Verfahrens anhand von drei EEG-Ableitungen (Fz, Cz, Pz). Es ist zu sehen, daß sich Lidschläge frontal bedeutend stärker markieren als parietal, wohingegen Augenbewegungen eine nahezu gleichmäßige Störungsverteilung von frontal nach parietal aufweisen. Bei sorgfältigem Abgleich der Korrekturpotentiometer werden alle EOG-Artefakte optimal beseitigt.

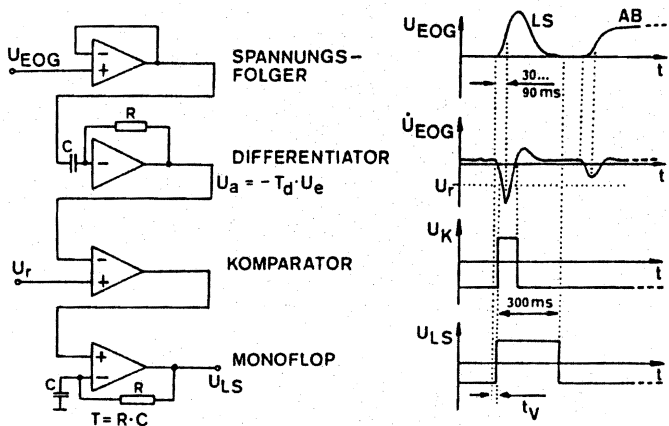


Abb. 2 Blockschaltbild Lidschlagenerkennung

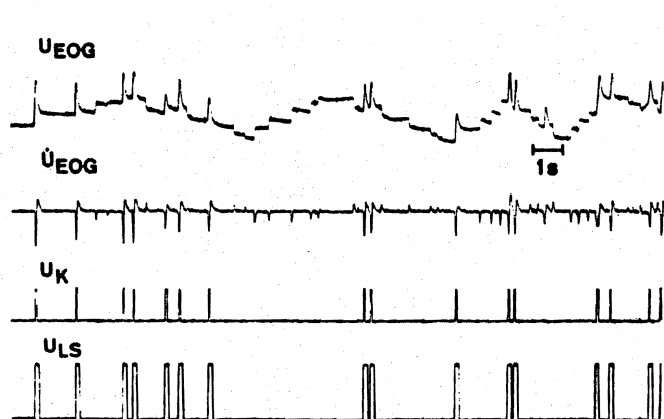


Abb. 3 oben: EOG-Registrierung mit Augenbewegungen (vertikale Blickrichtungsänderungen; ca. 3°) und Lidschlägen; darunter: Signalverläufe innerhalb der Lidschlagenerkennungsschaltung; 16 von 17 Lidschlägen werden erkannt

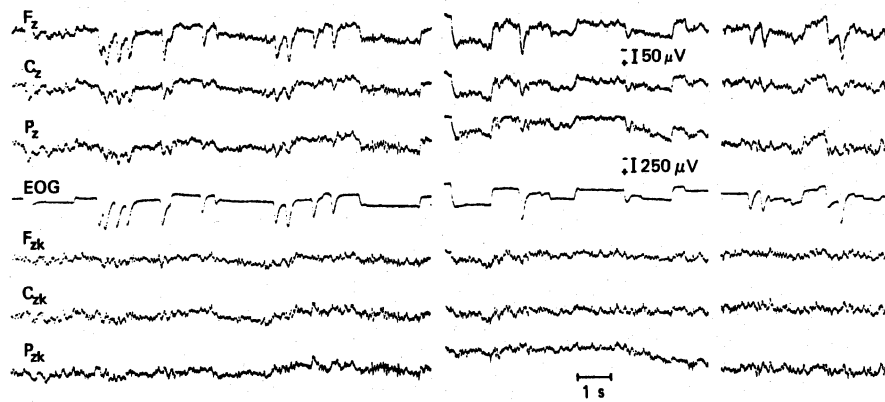


Abb. 4 Beispiele für die Korrektur von drei gestörten EEG-Ableitungen (Fz, Cz, Pz)

Abb. 5 zeigt, wie ein durch einen Reiz ausgelöster Lidschlag ein gleichzeitig ausgelöstes Hirnpotential überdecken kann. Hier ist natürlich keinerlei sinnvolle Analyse dieses Potentials möglich. Nach Anwendung des vorgestellten Korrekturverfahrens ist der Artefakt vollständig beseitigt. Ein Vergleich zum rechen-technischen Verfahren zeigt die gute Vergleichbarkeit beider Prozeduren.

Abb. 6 zeigt die Korrektur von ereignisbezogenen langsamen Potentialschwankungen (Slow potential shifts) zweier Versuchspersonen in einem psychophysiologischen Untersuchungsparadigma (5). Die Probanden hatten die Aufgabe, über Diapositive gestellte Kopfrechenaufgaben zu berechnen und über einen Tastendruck (Zeitpunkt 0: Beginn der Datenerfassung) das Ergebnis mitzuteilen. Nach 6 s erhielten sie eine

Rückmeldung über das erreichte Resultat in Form eines leichten Hautreizes auf die Hand; die Verarbeitung der Information geht mit der Ausprägung eines somatosensorisch evozierten Potentials einher (6).

Im gezeigten Beispiel wird die Analyse der reizvorgelagerten Potentialshifts wesentlich erschwert durch eine ereignisbezogene Augenbewegung nach der Ergebnismeldung (Abb. 6, links) bzw. durch massive Lidschläge bei einer anderen Versuchsperson, die nicht in der Lage war, ihre Augenaktivität zu beherrschen (Abb. 6, rechts). Nach Anwendung des analogen Korrekturverfahrens bzw. der Regressionskorrektur wird die Analyse der Potentialverläufe wieder möglich.

Bei den gezeigten Beispielen wurde das EEG und das EOG mit gesinterten Ag/AgCl-Elektroden (Ableitung EEG: Fz, Cz, Pz

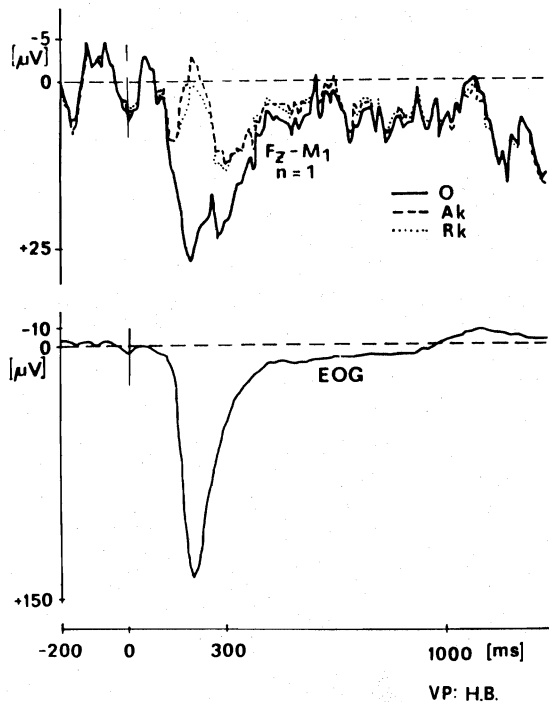


Abb. 5 Korrektur eines frontal abgeleiteten akustisch evozierten Potentials (Original: O, ausgezogene Linie) auf Reize, die zu zählen sind (Reizparameter: 60 dB SL, 50 ms) mit Hilfe des vorgestellten Korrekturverfahrens (Analogkorrektur: Ak, gestrichelte Linie) und des rechen-technischen Verfahrens (Regressionskorrektur: Rk, punktierte Linie)

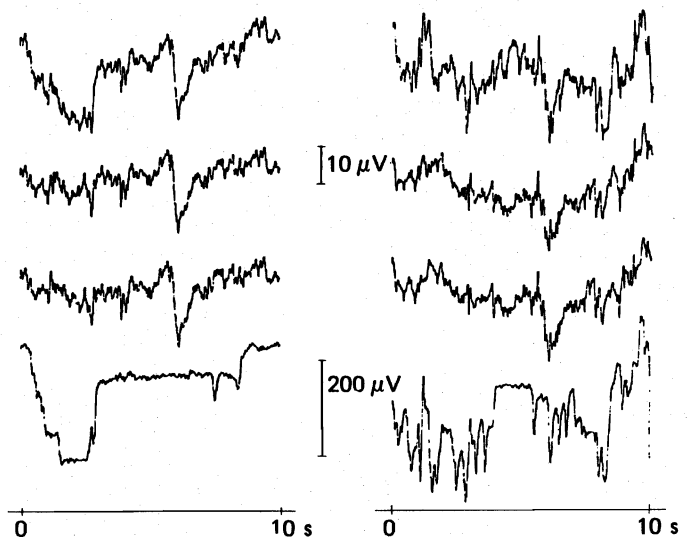


Abb. 6 Korrektur von ereignisbezogenen Slow potential shifts (SPS) (Ensemblemittelwerte, $n = 30$) von zwei Probanden; oben: Original-SPS; zweite Reihe: SPS nach Analogkorrektur; dritte Reihe: SPS nach Regressionskorrektur; unten: zugehöriger EOG-Ensemblemittelwert. Nach ca. 6 s somatosensorisch evoziertes Potential (Reizparameter: 3 mA, 0,5 ms) auf einen informationstragenden Rückmeldereiz

gegen A1 bzw. M1; EOG-Ableitung: bipolar vom linken Auge unmittelbar über bzw. unter dem Orbitalrand. Die Verstärkerparameter waren: Zeitkonstante 20 s, obere Grenzfrequenz 30 Hz, EOG-Verstärkung fünfmal geringer als EEG-Verstärkung.

Diskussion

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das beschriebene Korrekturverfahren den in der Literatur (8, 9, 10, 11) gestellten allgemeinen Anforderungen (siehe oben) an ein effizientes und universell einsetzbares Korrekturverfahren gerecht wird. In den gezeigten Beispielen kann dies belegt werden.

Ein Nachteil gegenüber rechentechnischen Verfahren besteht jedoch darin, daß die Einstellung der Korrekturfaktoren subjektiv vom Experimentator durch visuelle Kontrolle der EEG-Kanäle erfolgt. Bei einiger Erfahrung lassen sich daraus resultierende Fehler allerdings weitgehend minimieren.

Als weiterer Nachteil kommt hinzu, daß Artefakte im EOG-Kanal, die nicht auf Augenaktivität zurückgeführt werden (z. B. Hautpotentiale, Bewegungspotentiale), dem EEG zusätzlich überlagert werden. Bei sorgfältiger Elektrodenapplikation ist dies in der Regel vermeidbar.

Literatur

- 1 *Girton, D. B., J. A. Kamiya*: A simple on-line technique for removing eye movement artifacts from EEG. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 34 (1973) 212–216
- 2 *Barlow, J. S., A. Remond*: Eye movement artifact nulling in EEGs by multichannel on-line EOG subtraction. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 52 (1981) 418–423
- 3 *Gross, M.*: Minimierung von EOG-Artefakten im EEG bei DC-Ableitungen. Praktikumsbericht TH Ilmenau (1984), unveröffentlicht
- 4 *Schwind, J., W. U. Dormann*: Off-line removal of ocular artifacts from event-related potentials using a multiple linear regression model. *Int. J. Psychophysiol.* 4 (1986) 203–208
- 5 *Schwind, J., R. Haschke, W. U. Dormann, R. Rost*: Multivariate analysis of cortical slow potential shifts. In: *Progress in computer-assisted function analysis*, 209–214. Eds.: J. L. Willems, J. H. van Bommel, J. Michel. Elsevier (North Holland) 1988
- 6 *Haschke, R., W. U. Dormann, J. Schwind, W. Haschke*: ERP analysis of reafferent information processing during the performance of an arithmetical task. *Int. J. Psychophysiol.* 5 (1987) 25–32
- 7 *Schwind, J., R. Drewello*: Einsatzuntersuchung der Medicor-EEG-Elektrode für die Ableitung langsamer Gleichspannungsschwankungen beim Menschen. *Medizintechnik* 23 (1983) 120–122
- 8 *Quilter, P. M., B. MacGillivray, D. G. Wadbrock*: The removal of eye movement artifact from EEG signals using correlation techniques. *Random Signal Analysis*. Institution of Electrical Engineers (London). Conference Publication 159 (1977) 93–100
- 9 *Gratton, G., M. Coles, E. Donchin*: A new method for off-line removal of ocular artifacts. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 56 (1983) 468–484
- 10 *Verleger, R., T. Gasser, J. Möcks*: Correction of EOG artifacts in ERP of the EEG: aspects of reliability and validity. *Psychophysiology* 19 (1982) 472–480
- 11 *Fortgens, C., M. P. De Bruin*: Removal of eye movement and ECG artifact from the non-cephalic reference EEG. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 53 (1983) 90–96

J. Schwind, M. Gross: Verfahren zur on line-Minimierung von Lidschlag- und vertikalen Augenbewegungsartefakten im EEG. *Z. EEG-EMG* 19 (1988) 96–100

Anschrift

Dipl. Ing. *J. Schwind*, Klinik für Neurologie und Psychiatrie, Abteilung Neuroelektrodiagnostik, Bezirkskrankenhaus „E. Scheffler“, Gartenstraße 6, DDR-9400 Aue