

Aus der Neurologischen Klinik und Abteilung für Neurophysiologie  
der Universität Freiburg i. Br.

## Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und refferente Potentiale\*

Von

HANS H. KORNHUBER und LÜDER DEECKE\*\*

Mit 7 Textabbildungen

(Eingegangen am 23. Dezember 1964)

**Summary.** A method of *chronological data storage and reverse computation* is described by which bio-electrical phenomena preceding "spontaneous" events within the nervous system can be analysed if these events appear repeatedly and are capable of triggering a computer.

Slow brain potentials accompanying voluntary and passive movements of the limbs were analysed by this method. These potentials were recorded from different points of the scalp from 12 healthy subjects in 94 experiments with more than 100 movements in each record. At times artifacts were superimposed upon cerebral potentials. The former were identified, and, as far as was possible, eliminated.

Voluntary hand or foot movements are *preceded* by a slowly increasing *surface-negative cortical potential* of 10—15  $\mu\text{V}$ , called *readiness potential*. This potential is maximal over the contralateral precentral region, but shows bilateral spread and is larger over the frontal than over the occipital areas. The readiness potential increases with intentional engagement and is reduced by mental indifference of the subject.

Voluntary movements are *followed* by a complex potential with an early positive phase that begins 30—90 msec after the onset of movement. The late potentials following voluntary movements are similar to those after passive movements. Both resemble the late bilateral components of the evoked potentials after electrical stimulation of peripheral nerves. Some variable differences between the early components of the potentials after the onset of active and passive movements require further investigation.

No relation between the onset of voluntary movements and the phase of the alpha rhythm could be detected.

**Zusammenfassung.** Eine Methode zur *chronologischen Datenspeicherung* und *Rückwärtsanalyse* hirnelektrischer Begleitvorgänge wiederholter Willkürbewegungen beim Menschen wird beschrieben.

Mit dieser Methode wurden langsame Hirnpotentiale 1. bei *Willkürbewegungen* von Hand und Fuß und 2. bei ähnlichen *passiven Handbewegungen* bei 12 gesunden Menschen in 94 Versuchen mit je über 100 Bewegungen in 3 Kanälen untersucht.

\* Mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

\*\* Wesentliche Teile dieser Arbeit sollen von Herrn DEECKE als Dissertation der Medizinischen Fakultät der Universität Freiburg i. Br. vorgelegt werden.

Vor Willkürbewegungen der Hand und des Fußes entsteht ein langsam ansteigendes oberflächen-negatives Hirnpotential von 10–15  $\mu$ V, das *Bereitschaftspotential* genannt wird. Sein Maximum liegt über der kontralateralen Präcentralregion bei bilateraler Verteilung über der Schädelkonvexität, frontal größer als occipital. Es wächst mit Aufmerksamkeit und intentionaler Beteiligung der Versuchsperson und nimmt bei Gleichgültigkeit ab. Eine Korrelation des Beginns der Willkürbewegungen zur Phase des Alparhythmus war nicht nachweisbar.

Nach der Willkürbewegung entsteht ein mehrphasisches Potential mit früher *Positivierung*, die 30–90 msec nach der Bewegung beginnt. Die Hirnpotentiale nach Willkürbewegung ähneln denen nach passiver Bewegung und den späten Komponenten des „evoked potential“ auf elektrischen Medianusreiz. Variable Unterschiede der frühen Potentialänderungen nach aktiven und passiven Bewegungen bedürfen weiterer Untersuchung.

Weitergehende Anwendungen der Rückwärtsanalyse werden besprochen. Ähnlichkeiten des Bereitschaftspotentials zur Erwartungswelle G. WALTERS bei bedingten Reflexen und Quellen von Artefakten durch Augenbewegungen usw. werden diskutiert.

Die Motorik ist bisher elektrophysiologisch viel weniger untersucht als die sensorische Afferenz. BATES<sup>2</sup> fand beim Menschen ein Hirnpotential nur nach, nicht vor dem Beginn der Bewegung. Er interpretierte dieses Potential als reafferentes sensorisches evoked potential. KRUGER u. HENRY<sup>13</sup> bemerkten bei Affen Blockade des Rolandischen Betarhythmus mit Beginn oder nach, nicht vor der Bewegung. Hingegen fand CASPERS<sup>4</sup> bei der Ratte corticale Gleichspannungsänderungen, die mit spontanen Bewegungen korrelierten und diesen oft vorausgingen. JASPER u. PENFIELD<sup>10</sup> beschrieben in einem Falle, daß der präzentrale Betarhythmus bereits bei der Aufforderung, sich für eine Handbewegung bereit zu machen, blockiert sein konnte. Blockade des seltenen Arkadenrhythmus der Zentralregion kurz vor dem Beginn von Willkürbewegungen wurde von KLASS u. BICKFORD<sup>11</sup> sowie von CHATRIAN u. Mitarb.<sup>5</sup> festgestellt. In Konditionierungsexperimenten wurden langsame cerebrale Potentialänderungen zwischen dem konditionierenden und dem indikativen Reiz, also vor der Reaktion, von SHVETS<sup>15</sup> beim Kaninchen, von ROWLAND u. GOLDSTONE<sup>14</sup> an der Katze und von WALTER u. Mitarb.<sup>19</sup> beim Menschen gefunden. WALTER<sup>18</sup> nannte dieses vorwiegend frontal auftretende Oberflächen-negative Hirnpotential „expectancy wave“ oder Erwartungswelle.

Außer diesen wenigen Hinweisen von EEG-Befunden und bedingten Reflex-Untersuchungen gibt es bisher keine systematischen hirnelektrischen Ableitungen, die *cerebrale Korrelationen willkürlicher Aktionsbereitschaft beim Menschen* nachweisen. Wir haben daher solche Untersuchungen mit modernen Computer-Methoden an reinen Willkürbewegungen durchgeführt, deren Handlungsbereitschaft im Gegensatz zu Konditionierungsexperimenten von vorangehenden sensorischen Reizen unabhängig ist.

Ziel dieser Arbeit ist zu prüfen, welche Hirnpotentialänderungen beim Menschen Willkürbewegungen einleiten und begleiten und ob die Potentiale bei aktiven von denen bei passiven Bewegungen verschieden sind. Eine Nebenabsicht war dabei, nach Hinweisen auf Änderungen der Affferenz durch die motorische Efferenz zu suchen. Dazu wurde eine neue Methode entwickelt<sup>12</sup>, die auch diejenigen bioelektrischen Ereignisse erfaßt, die den spontanen Bewegungen *vorausgehen*. Das Prinzip ist *Magnetbandspeicherung* und *Rückwärtsanalyse*.

### Methodik

Das EEG von 12 gesunden Versuchspersonen (Studenten) wurde in 94 Versuchen über ein Schwarzer-EEG-Gerät E 502 mit verlängerter Zeitkonstante auf ein Mehrkanal-Magnetband (MAS 24-4, Telefunken) mit Trägerfrequenz gespeichert. *Willkürbewegungen* der Versuchsperson, in Triggerimpulse umgeformt und mitgespeichert, dienten zur Auslösung des Mnemotron CAT 400 B Computers. Durch Rückwärts- und Vorwärtsanalyse des Bandes bei großer Zahl von Willkürbewegungen sind corticale Potentialänderungen vor und nach der Bewegung darstellbar. Die Zusammenfügung des Potentialverlaufs vor und nach dem Beginn der Bewegung wird durch kurze zeitliche Intervalle zwischen den Kurvenpunkten erleichtert. Eine exakte Lösung dieses Problems ist durch Mitregistrierung eines zweiten, verzögerten Triggerimpulses möglich. Durch Registrierung des Elektromyogramms der Agonisten wurde das Intervall vom Beginn der Muskelaktivität bis zur Auslösung des Triggerimpulses gemessen. Es wurden ausgesucht artefaktfreie unpolarisierbare Silber-Silberchlorid-Klebeelektroden oder (zur Verminderung galvanischer Hautreflexe) Nadelelektroden verwandt. Die Gesamt-Zeitkonstante betrug 1,3 sec. Abgeleitet wurde vorwiegend unipolar gegen Nase, Kinn, Sternum und Vertebra prominens, ipsilaterales Ohr oder beide Ohren, seltener bipolar in Längsreihe oder präzentral kontra- gegen ipsilateral. Bisher wurden willkürliche und passive Handbewegungen sowie aktive Fußbewegungen untersucht. Die Untersuchung von Augenbewegungen, Phonation und höheren Leistungen ist im Gange.

Der Einfluß von Störungen (galvanische Hautreflexe, Elektrodenartefakte) ist durch einen Null-Versuch abzuschätzen, in dem die Summation von Kurvenstrecken nicht durch die Bewegungen der Versuchspersonen, sondern zufällig ausgelöst wird. Über Vermeidung von Lidschlagartefakten vgl. S. 7 die Ergebnisse.

Zur Bestimmung der Rolandischen Linie bedienten wir uns des Schemas von TAYLOR u. HAUGHTON<sup>16</sup>. Bei Handbewegungen wurde 1 cm frontal der Mitte dieser Linie, bei Fußbewegungen auch vom Vertex abgeleitet.

Die *Zahl der Bewegungen* pro Versuch lag zwischen 100 und 500. Drücken einer Taste mit dem Zeigefinger oder Handballen, eines Gummiballs durch Faustschluß oder Ziehen eines Fadens durch Beugung im Handgelenk lieferten ähnliche Ergebnisse. Die Fußbewegung bestand in Tastendruck mit der bloßen Großzehe oder mit dem beschuhten Vorfuß. Alle Bewegungen kehrten jeweils sofort in die Ausgangslage zurück. Auf Konstanz der Bewegungsgeschwindigkeit während des Versuchs wurde geachtet. Die *passiven* Handbewegungen wurden den aktiven möglichst ähnlich ausgeführt. In einem Teil der Versuche wurde Faustschluß unter Umfassung der Hand der Versuchsperson herbeigeführt. In anderen Versuchen wurde passive Beugung im Handgelenk durch Zug an einem Seil erreicht, das an den Fingerspitzen 1—3 festgeklebt war. Die Versuchsperson wurde meist aufgefordert, die Bewegung *nicht rhythmisch*, sondern in unregelmäßigen Abständen auszuführen. In einigen Versuchen wurden rasche rhythmische Handbewegungen untersucht. Sonst wurden

Pausen von mehr als 15 sec eingehalten. In einigen Experimenten vermieden wir durch Pausen von mehr als 25 sec eine Überlagerung mit Kondensator-bedingten Nachschwankungen von Potentialen der vorausgehenden Bewegung.

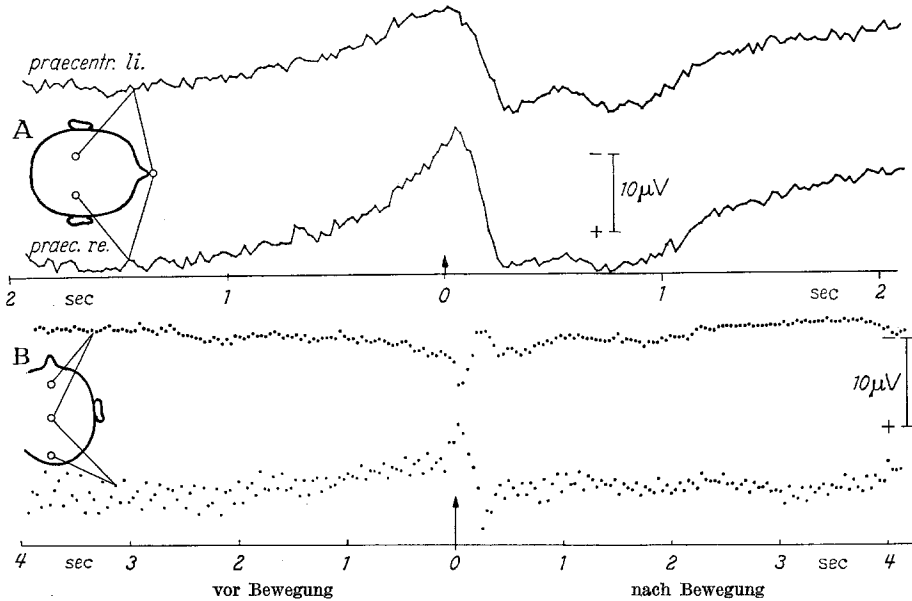


Abb.1. A Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen der linken Hand, Bewegungsbeginn in allen Abbildungen beim Pfeil. Negatives Potential bei Bereitschaft, positives nach Aktion mit größerer Amplitude über der *kontralateralen* (rechten) Großhirnhemisphäre. Unipolare Ableitungen von der Präzentralregion gegen die Nase. Durchschnitt aus 512 Bewegungen. Negativität nach oben. Links von 0 = Zeit vor dem Bewegungsbeginn im Elektromyogramm. Vp. G.F.

B Die bipolare Reihenableitung mit sagittalen Elektroden bei Willkürbewegung der rechten Hand zeigt Phasenumkehr um die präzentrale Elektrode: die *prämotorische Negativierung* und die *postmotorische Positivierung* sind über der Zentralregion am stärksten. In der fronto-präzentralen Ableitung ist Negativität der präzentralen Elektrode nach unten, in der präcentro-occipitalen nach oben. Durchschnitt aus 400 Bewegungen. Vp. B.C.

## Ergebnisse

**Willkürbewegungen.** Die typischen corticalen Potentialschwankungen (Abb. 1–5) sind manchmal schon nach 20 Willkürbewegungen wenigstens andeutungsweise zu sehen. Oft findet man erst bei mehr als 100 Bewegungen einen genügend glatten Null-Versuch und eine verwertbare Kurve. Willkürbewegungen der Hand oder des Fußes geht regelmäßig ein langsam anwachsendes Oberflächen-negatives Potential voraus, das durchschnittlich (mit großer Streuung) 1–1,5 sec vor der Muskelaktivität beginnt und eine Höhe von durchschnittlich etwa 10 bis  $15\mu\text{V}$  erreicht. Diese flach ansteigende negative Welle vor der Bewegung wird im folgenden auch „*Bereitschaftspotential*“ genannt. Das Intervall vom Beginn des negativen Potentials bis zur Willkürbewegung ist kleiner bei kurzen Abständen zwischen den Bewegungen. In verschiedenen Ver-

suchen wurden Intervalle zwischen 0,4 und 4 sec vom Beginn der Potentialänderung bis zum Bewegungsbeginn gefunden. Das Bereitschaftspotential erreicht seinen Höhepunkt über der kontralateralen Zentral-

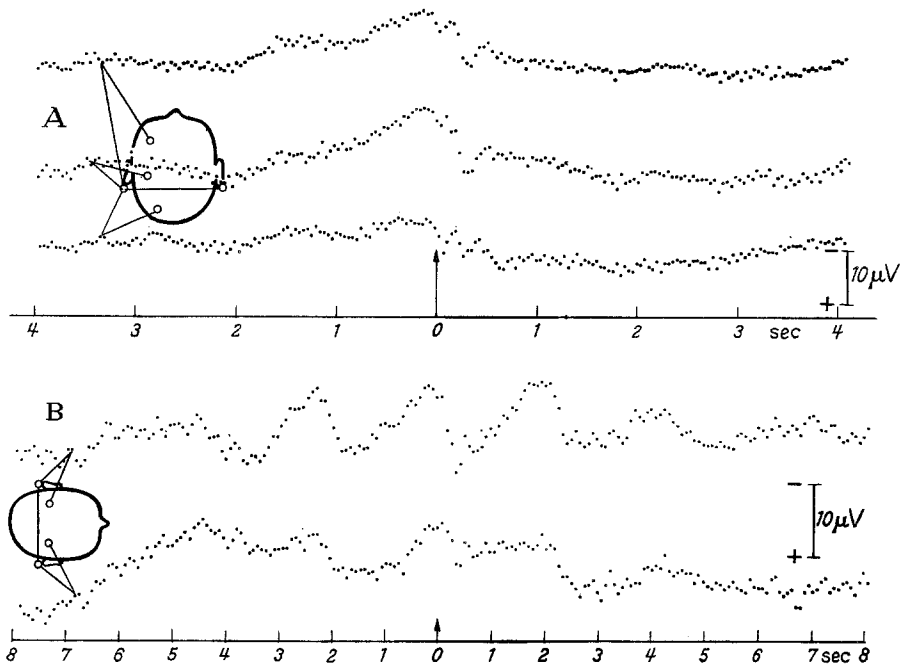


Abb. 2. A *Weite Ausbreitung* des Bereitschaftspotentials vor Willkürbewegungen und der reafferenten Potentiale nach der Bewegung der kontralateralen Hand über die Hirnkonvexität mit ähnlichem Ablauf frontal, präzentral und occipital. Occipital geringere Amplitude des Bereitschaftspotentials. Ableitung gegen beide Ohren. Durchschnitt aus 256 Bewegungen. Vp. B. C.

B Hirnpotentialablauf bei annähernd *rhythmischem* Tastendruck mit der rechten Hand etwa 0,45/sec. Mit zunehmender Entfernung vom Beginn des Summationsprozesses im Computer werden die Potentialänderungen verwischt, weil die Bewegungen nicht genau rhythmisch folgen. Hirnpotentiale größer über der kontralateralen (linken) Hemisphäre. Ableitung gegen beide Ohren. Durchschnitt aus 170 Bewegungen. Vp. B. C.

region 30—90 msec (meist um 50 msec) *nach* dem Beginn der Bewegung (im Elektromyogramm), dann folgt Abfall zu postmotorischer Positionierung. Bei annähernd rhythmischen Willkürbewegungen kann man die rhythmischen cerebralen Potentialschwankungen durch längere Analysisdauer sichtbar machen (Abb. 2B).

Das prämotorische negative Potential ist in der Präzentralregion meist größer über der zur Bewegungshand *kontralateralen* Hemisphäre als über der ipsilateralen, und zwar unabhängig davon, ob die rechte oder die linke Hand bewegt wird. Das ipsilaterale Potential beträgt im Durchschnitt nur 75% des kontralateralen. Außerdem zeigt um den Beginn der

Bewegungen das kontralaterale Potential oft noch starke Zunahme, während das ipsilaterale nur wenig wächst oder schon abzufallen beginnt (Abb. 1 A).

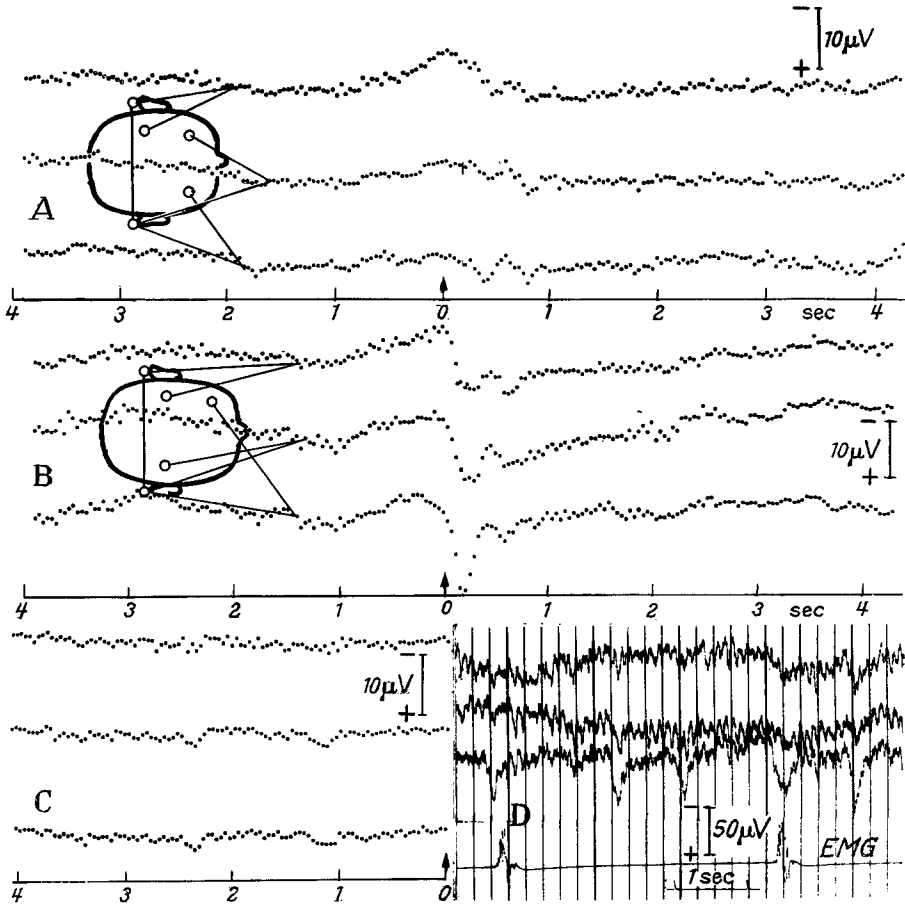


Abb. 3 A—D. Die Koordination von Handbewegung und Lidschlag führt zur Überlagerung der Hirnpotentiale mit einem Augenpotential

A Hirnpotentiale ohne Augenpotential. Die Versuchsperson fixiert einen festen Punkt mit dem Blick und unterdrückt während der Handbewegung den Lidschlag. Präzentral größeres Bereitschaftspotential als frontal. Ableitung gegen beide Ohren. Durchschnitt aus 280 Bewegungen. Vp. P. S.

B Die Hirnpotentiale der selben Versuchsperson bei Handbewegungen (Ballondruck) sind infolge von Lidschlag (bei geschlossenen Augen) von einem positiven Augenbewegungspotential überlagert, das mit der Handbewegung beginnt und frontal größer ist als präzentral. Durchschnitt aus 256 Bewegungen. Ableitung gegen beide Ohren. Bei dem langsamen negativ-positiven Potential vor dem Bereitschaftspotential handelt es sich um eine Kondensator-bedingte Nachschwankung von Hirnpotentiale bei der vorausgehenden Bewegung

C Null-Versuch mit der Magnetbandregistrierung des in 3 A gezeigten Versuches

D Die simultane Registrierung von EEG und Elektromyogramm der Flexoren am Unterarm zeigt die Koinzidenz der Augenbewegungen (Lidschlag bei geschlossenen Augen) mit den Handbewegungen (Ballondrücken). EEG-Kurven-Stück der in 3 B gezeigten Ableitung. Der Augenartefakt ist an der Schädelkonvexität positiv und frontal am größten

Das negative Potential vor der Bewegung ist meist über die ganze Großhirnkonvexität von frontal bis occipital ausgedehnt (Abb. 2A), hat aber in der Zentralregion die größte Amplitude. Das ist sowohl in unipolaren als auch in bipolaren Reihenableitungen zu sehen. In diesen findet sich Phasenumkehr um die präzentrale Elektrode (Abb. 1B). Frontal ist das Bereitschaftspotential meist größer als occipital; es kann occipital fehlen (Abb. 6A).

Der Potentialablauf *nach* Handbewegungen ist mehrphasig und hängt von der Geschwindigkeit der einzelnen Bewegungen ab. Außerdem zeigt er individuelle Unterschiede. Bei *mittlerer Bewegungsgeschwindigkeit* (Dauer der Muskelaktivität im Elektromyogramm der Beuger um 250 msec) und grober Auflösung im Computer (Punktintervall = 40 msec) ist ein typischer Potentialablauf folgender (Abb. 1A, 3A, 4A): das erste Maximum der Positivierung liegt bei Finger- und Handbewegungen durchschnittlich bei etwa 330 msec nach Bewegungsbeginn. Es folgt eine kleine negative Zacke mit Maximum bei etwa 500 msec, dann ein zweites positives Maximum bei etwa 690 msec. Dann kommt oft noch eine flache negative Welle. Bei *rascher* Ausführung der einzelnen Bewegungen und feinerer Auflösung (Punktintervall 10 msec) finden sich mehr Gipfel, und die Potentialänderungen sind gedrängter (Abb. 7C): nachdem die vor der Bewegung beginnende Negativierung 30–80 msec nach Bewegungsbeginn ihren Gipfel erreicht hat, treten über der kontralateralen Zentralregion meist 4 positive Gipfel mit Latenzen von etwa 120, 290, 400 und 550 msec und 3 negative Gipfel bei etwa 200, 330, 480 msec auf, danach flache Negativierung. Ausprägung und Latenz der späten Gipfel sind variabler als die der frühen. Der erste Gipfel nach der Bewegung hat oft über der kontralateralen Hemisphäre eine größere Amplitude als über der ipsilateralen. Die späten Wellen sind bilateral mehr oder weniger symmetrisch. Der erste Gipfel nach der Bewegung zeigt oft starke Unterschiede über verschiedenen Hirnregionen von frontal bis occipital, während die späteren über verschiedenen Hirnregionen einander ähnlicher sind (vgl. Abb. 7).

Der Höhepunkt der vor der Bewegung beginnenden Negativierung und der erste Teil des Potentials nach der Bewegung sind manchmal von einem *Augenbewegungsartefakt* überlagert, der oft koordiniert mit der Handbewegung auftritt (Abb. 3). Dieser in unipolaren Ableitungen von der Schädelkonvexität positive Artefakt ist aber über der Frontalregion am stärksten und erreicht sein Maximum schon 80–160 msec nach dem Beginn der Handbewegung und ist dadurch von der stärksten cerebralen Positivierung nach der Bewegung zu unterscheiden. Lidschlagfreie Ableitungen erhielten wir durch EEG-Registrierungen mit häufigen kurzen Pausen, zwischen denen die Versuchsperson den Lidschlag unterdrückte und einen festen Punkt fixierte.

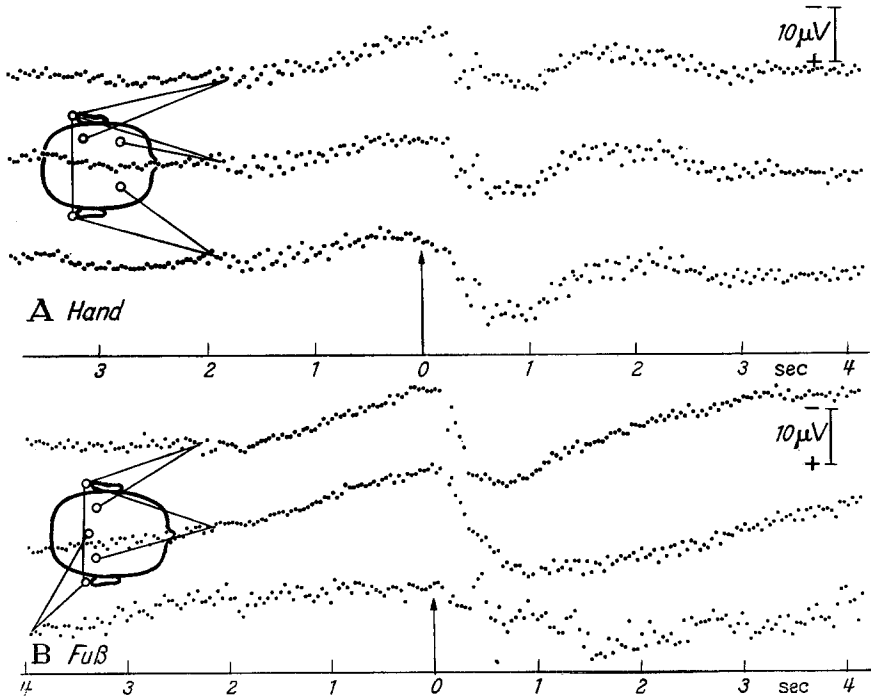


Abb. 4. Der Vergleich von *Handbewegung* (A) und *Fußbewegung* (B) zeigt ähnliche Potentialänderungen über der Großhirnkonvexität. Ableitungen gegen beide Ohren. Durchschnitt aus je 256 Bewegungen.

Vp. B. C.

A Ballondrücken mit der rechten Hand. Augen zu. Nadelelektroden  
B Tastendruck mit der rechten Großzehe. Augen zu. Klebeelektroden

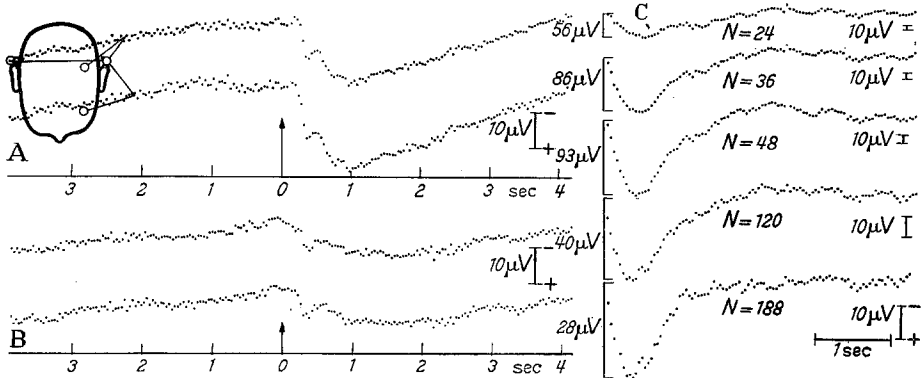


Abb. 5 A—C. *Einfluß der intentionalen Beteiligung* auf die Größe der Hirnpotentiale bei Willkürbewegungen. Einander unmittelbar folgende Experimente bei derselben Versuchsperson (B. C.). Ableitungen gegen beide Ohren. Gleiche Anzahl der Handbewegungen in A und B ( $N$  je 256). A starke,

B geringe intentionale Beteiligung

C *Einfluß der psychischen Spannung* auf Ausbleiben oder Auftreten von *Habituation* der Hirnpotentiale nach Willkürbewegungen der rechten Hand (gezeigt ist nur der postmotorische Teil der Kurve). Ableitung präzentral kontralateral gegen Nase. Mittelbildungen aus den ersten 24, 36, 48, 120 und 188 Bewegungen eines fortlaufenden Versuchs. Unwissende, anfänglich stark gespannte Versuchsperson (A. H.). Ungewöhnlich große Hirnpotentiale, die zunächst sogar noch zunehmen. Nach der 50. Bewegung wurde eine Erklärung des Experiments gegeben, worauf intentionale Beteiligung und Amplituden der Hirnpotentiale nachließen



Bei *Hand- und Fußbewegungen* findet sich prämotorisch eine ähnliche Negativierung (Abb. 4). Auch postmotorisch ist der Potentialablauf in großen Zügen ähnlich, doch gibt es einige feine Unterschiede, wie bei reafferenten evoked potentials zu erwarten ist.

Bei der gleichen Art von Bewegung finden sich bei derselben Versuchsperson Variationen der Größe der Hirnpotentiale vor und nach der Bewegung in Abhängigkeit von Bedingungen, die von den Versuchspersonen als Konzentration, Aufmerksamkeit, Sorgfalt, Spannung einerseits und andererseits als Ermüdung oder Gleichgültigkeit beschrieben werden. Unter sonst gleichen Bedingungen ist bei stärkerer *intentionaler Beteiligung* an der Ausführung der Bewegungen das Potential größer (Abb. 5). Von der intentionalen Beteiligung hängt offenbar auch das Ausbleiben oder Auftreten von *Habituation* ab: solange die Versuchsperson auf den Erfolg des Versuchs gespannt ist, zeigen die cerebralen Potentiale vor und nach der Bewegung gewöhnlich keine Verminderung mit steigender Anzahl der Bewegungen. Dagegen werden die Potentiale mit fortschreitender Versuchslänge kleiner, wenn die intentionale Spannung nachläßt (Abb. 5).

*Willkürbewegungen und spontane Hirnpotentiale (Alpharhythmus)*. Von unseren 12 Versuchspersonen hatten 4 auch präzentral und frontal einen gut ausgeprägten Alpharhythmus, der durch Willkürbewegungen partiell blockiert wurde. Eine feste Beziehung der Alphaphase zum Beginn der Willkürbewegungen fand sich in unipolaren Ableitungen weder präzentral noch occipital. Natürlich zeigten bei Summation von bewegungsgekoppelten Kurvenstrecken die Summen eine Alphamodulation, aber mit Amplituden, die nicht signifikant vom Erwartungswert

$$A_N = A_0 \sqrt{N} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (\text{Standardabweichung } A_0 \sqrt{N} \frac{\sqrt{4-\pi}}{2}),$$

D. MORGENSTERN, persönl. Mitteilung) bei Summation einer Sinusschwingung konstanter Frequenz mit zufälligen Phasenverschiebungen abwichen (Abb. 6). Ähnliches fand sich experimentell im Null-Versuch und bei Summation von technischen Sinusschwingungen mit zufälligen Phasenverschiebungen. Eine *scheinbare* Zunahme der occipitalen Alphaamplitude bei Bewegung trat manchmal infolge von Alphablokierung vor der Bewegung und Wiedereinsetzen occipitaler Alphaspindeln während der Bewegung auf (Abb. 6).

**Passive Handbewegungen.** Vor dem Beginn passiver Handbewegungen finden sich meist keine cerebralen Potentialänderungen außer den spontanen Rhythmen. Bei rhythmischer Bewegungsfolge und intentionaler Beteiligung der Versuchsperson kann sich allerdings eine dem Bereitschaftspotential ähnliche, allmählich ansteigende Negativierung vor der Bewegung einstellen.

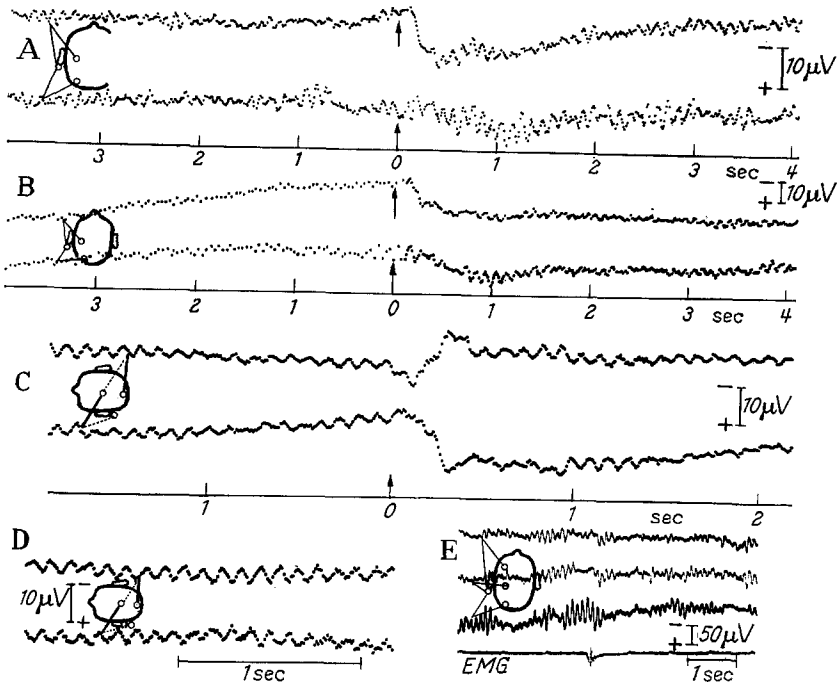


Abb. 6 A—E. Willkürbewegungen der Hand und spontane Hirnrhythmen (Alpha-Wellen).

- A Blockierung des Alparhythmus in der kontralateralen Präzentralregion während der Willkürbewegung. Occipital dagegen kurze Alphablockierung vor der Bewegung zu Beginn der präzentralen Bereitschaftswelle, die in diesem Fall occipital fehlt. Während und nach der Bewegung occipital großer Alparhythmus. Alphaamplitude im EEG 1 sec vor der Bewegung occipital im Durchschnitt  $55 \mu\text{V}$ , nach der hier gezeigten Mittelbildung aus 200 Bewegungen  $3,6 \mu\text{V}$  (Erwartung  $= 3,4 \mu\text{V}$ )
- B Occipitale Alphablockierung während des Bereitschaftspotentials vor Willkürbewegungen der rechten Hand. Wiederauftreten von occipitalen Alphaspindeln 250 msec vor den Bewegungen (= scheinbare Zunahme der Alphaamplitude bei Bewegung)
- C Die bipolare Ableitung läßt ebenfalls keine Korrelation des Beginns der Willkürbewegungen mit einer festen Phase des Alparhythmus erkennen
- D Der Null-Versuch mit Summation zufälliger Kurvenstücke aus dem in C gezeigten Experiment ergibt die gleichen Alphaamplituden
- E Ausschnitt aus der EEG-Kurve des in B gezeigten Versuchs: kurz vor und während der Handbewegung präzentral komplette Alphablockierung, dagegen occipital Wiederauftreten des Alparhythmus. Frontal nur geringe Alphablockierung bei Bewegung

Die während und nach passiven Bewegungen auftretenden Hirnpotentiale sind im ganzen den Potentialen bei aktiven Willkürbewegungen ähnlich (Abb. 7). Insbesondere ist eine frühe Negativierung mit Gipfel bei etwa 50 msec nach Bewegungsbeginn auch bei passiver Bewegung oft vorhanden, wenn auch nicht so konstant wie bei aktiver. Soweit präzentral ein Alparhythmus vorhanden ist, wird er während der passiven Bewegung meist weitgehend blockiert.

Die Latenzen der einzelnen positiven und negativen Gipfel vom Beginn der Bewegung (der bei passiver Bewegung mit dem Aktivitätsbeginn im Elektromyogramm des Versuchsleiters gleichgesetzt wurde)

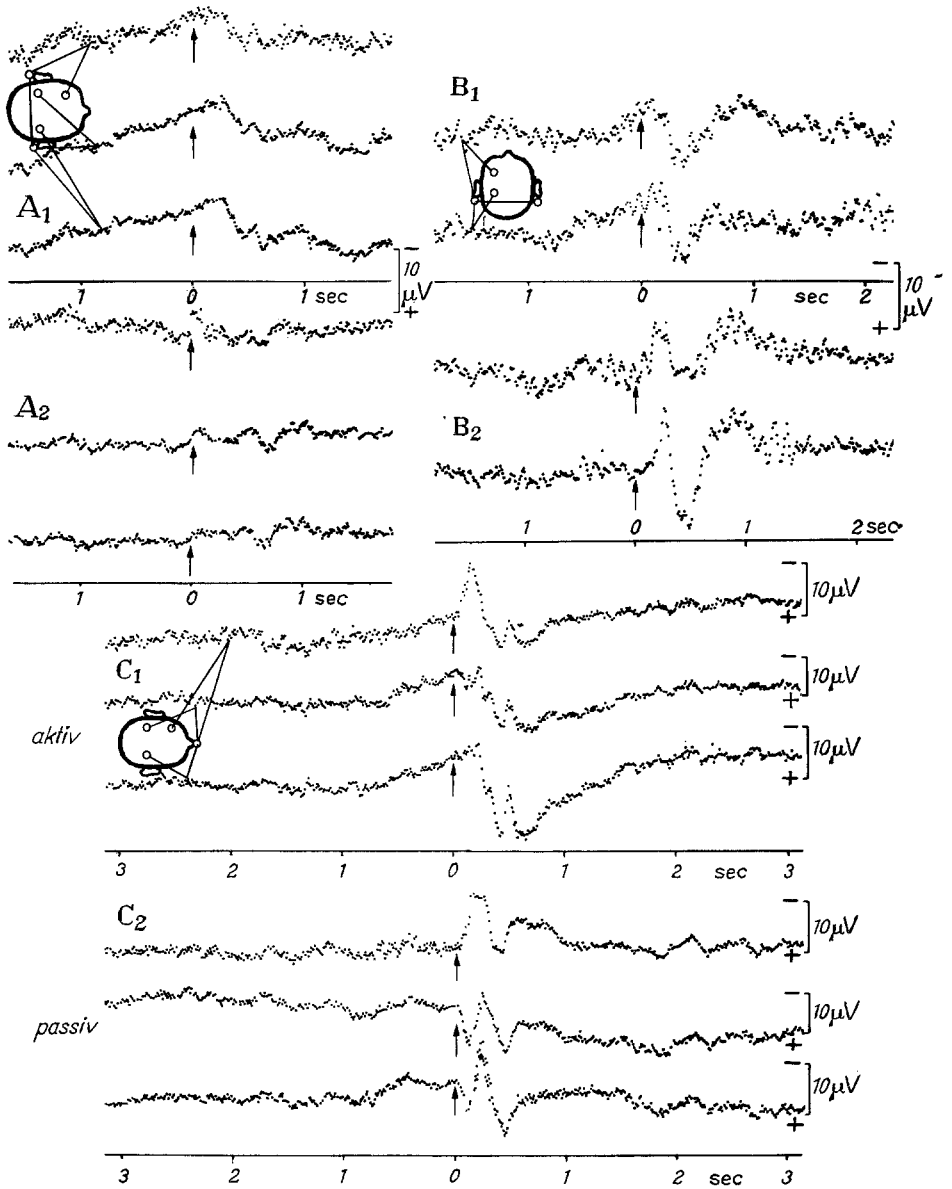


Abb.7. Vergleich der Hirnpotentiale bei *passiven* und ähnlichen *willkürlichen Bewegungen* der rechten Hand bei drei verschiedenen Versuchspersonen. In A bis C jeweils oben (1) Willkürbewegungen, unten (2) passive Bewegungen mit Ableitung von identischen Stellen. A und B Klebelektroden, C Nadelelektroden. Fehlen des Bereitschaftspotentials vor passiven Bewegungen. Stärkere Gesamtpotentialdifferenz in A nach Willkürbewegung, in B nach passiver Bewegung. In C unterschiedlicher Potentialablauf nach passiven und Willkürbewegungen

waren bei passiven Bewegungen im Durchschnitt etwa 30 msec kürzer als bei Willkürbewegungen. Bei rascher passiver Handbewegung traten positive Gipfel im Durchschnitt bei 90, 240, 390 und 500 msec, negative bei 40, 190, 280 und 470 msec auf. Während die späten Komponenten des Komplexes über der Präzentralregion ipsi- und kontralateral meist keine konstanten Amplitudendifferenzen zeigen, ist der erste positive Gipfel bei 90–100 msec, wenn ein solcher vorhanden ist, meist kontralateral größer; er hat ipsilateral im Durchschnitt nur Zweidrittel der kontralateralen Amplitude.

Unterschiede zwischen aktiven und passiven Bewegungen sind in den *späten* postmotorischen Hirnpotentialen nicht konstant erkennbar. Die Gesamtpotentialdifferenz (zwischen dem größten positiven und negativen Gipfel) ist bei einigen Versuchen bei passiven, bei anderen bei aktiven Bewegungen größer, letzteres besonders dann, wenn der aktiven Bewegung ein starkes Bereitschaftspotential vorausgeht, wofür offenbar die intentionale Beteiligung der Versuchsperson bedeutsam ist.

Dagegen ist (bei rascher Bewegung, deren Ergebnisse am genauesten vergleichbar sind) der *erste* Potentialgipfel nach der Bewegung bei aktiven und passiven Bewegungen oft deutlich verschieden (Abb.7). Vor allem zeigen einige Versuchspersonen bei passiver Bewegung eine starke Positivierung mit Gipfel bei 80–90 msec, ohne daß eine Negativierung vorausging, und dieses positive Potential ist oft erheblich größer als das entsprechende bei aktiver Bewegung. Dieser frühe große positive Gipfel bei passiver Bewegung findet sich besonders über der Zentralregion, während frontal zu dieser Zeit bei einigen Versuchspersonen — es handelt sich anscheinend um eine individuelle Eigentümlichkeit — ein negativer Gipfel auftritt. Manchmal findet sich dagegen bei passiver Bewegung zuerst eine stärkere Negativierung mit Gipfel um 50 msec, während bei aktiver Bewegung zu dieser Zeit nur eine geringe Negativierung auftritt. Bei einer Versuchsperson zeigte sich bei passiver Bewegung ein starker negativer Gipfel bei 230 msec, dem bei aktiver ein viel kleinerer entsprach.

### Besprechung der Ergebnisse

Unsere Methode der *Rückwärtsanalyse* einer *chronologisch gespeicherten* Folge von Ereignissen eröffnet ein neues Untersuchungsfeld. Sie ermöglicht die Darstellung der zeitlichen und räumlichen Ausbreitung von Potentialen im Nervensystem, die volitive, affektive, gnostische oder motorische Prozesse begleiten oder ihnen vorausgehen, sofern diese Prozesse wiederholbar sind und direkt oder indirekt zur Auslösung von Verarbeitungsvorgängen in einem Computer verwandt werden können. Wiederholbarkeit ist erforderlich, wenn die Größe der auftretenden Signale unter dem Rauschpegel liegt: z. B. beträgt das Bereitschaftspotential vor Bewegungen (bei der von uns verwandten Gesamtzeitkonstante

von 1,3 sec) etwa  $10-15 \mu\text{V}$ , der Alparhythmus der Hirnrinde dagegen oft das Fünffache. Die Methode der Rückwärtsanalyse chronologisch gespeicherter biologischer Daten ist natürlich auch außerhalb der Neurophysiologie anwendbar. Ihre Verwendung ist immer dann zu erwägen, wenn die Genese scheinbar spontan auftretender Ereignisse durch Mittelbildung aus einem „Rauschen“ herausgehoben werden muß.

Gleichspannungsableitung von der Kopfschwarte, die wegen der Langsamkeit der auftretenden Potentialänderungen zu bevorzugen wäre, haben wir nicht angewandt, weil es uns noch nicht gelang, eine genügend empfindliche Gleichspannungsverstärkung über hinreichend lange Zeit zu stabilisieren. Wahrscheinlich kommt man bei Gleichspannungsverstärkung mit einer geringeren Zahl von Bewegungen aus, weil sie die langsamen Potentialänderungen in ihrer wahren Größe zeigt. Natürlich wird auch die Form langsamer Potentialänderungen durch Kondensator-koppelung verändert.

Bei der Deutung von Summationsergebnissen muß man besonders vorsichtig sein. Kleinste *Artefakte*, die im EEG nicht auffallen, können durch Summation groß werden, wenn sie in einigermaßen fester zeitlicher Beziehung zu denjenigen Ereignissen auftreten, die den Summationsprozeß auslösen. Wir sehen gegenwärtig bei der Untersuchung von Hand- und Fußbewegungen folgende 3 möglichen Arten von Artefakten:

1. Artefakte infolge von *Mitbewegungen* der Augen oder der Muskulatur am Kopf und Nacken. Das langsam anwachsende Bereitschaftspotential vor der Bewegung kann zwar durch derartiges nicht bedingt sein, doch sind die Potentialänderungen während der Bewegung durch *Augenartefakte* überlagert, wenn Augenbewegungen während der Handbewegung nicht durch Fixation eines festen Punktes unterdrückt werden. Myogene Artefakte von der Nackenmuskulatur, wie sie von BICKFORD u. Mitarb.<sup>3</sup> bei akustischen und somatosensiblen evoked potentials gefunden wurden, kommen für die präzentral und frontal am größten auftretenden Potentiale bei Extremitätenbewegungen höchstens als kleine Komponenten in Betracht. Für eine mit Handbewegungen korrelierte Aktivität im Musculus temporalis ergab das EEG in unseren Versuchen keinen Anhalt.

2. Durch Artefakte infolge von *Wackeln oder Schwingen der Elektroden oder Leitungen* haben wir uns anfänglich täuschen lassen. Das langsame negative Bereitschaftspotential kann zwar durch dergleichen nicht bedingt sein, doch ist eine Überlagerung der Wellen bei und nach den Bewegungen durch solche Artefakte möglich. Die Konstanz der großen Züge des postmotorischen Potentialablaufs mit seiner Positivierung unter verschiedenen Kopfhaltungen und bei verschiedenen Fixierungen von Kopf, Elektroden und Leitungen spricht zwar gegen Wackelartefakte, doch ist bisher nicht auszuschließen, daß manche Besonderheiten des

Potentialablaufs nach Bewegungsbeginn in einzelnen Versuchen sowie Unterschiede zwischen den Wellen bei aktiven und passiven Bewegungen auf solche Artefakte zurückzuführen sind.

3. Der *galvanische Hautreflex*. Eine Assoziation des galvanischen Hautreflexes mit aktiven oder passiven Bewegungen wäre an sich denkbar, doch sprechen unsere bisherigen Erfahrungen dagegen, wenigstens was den im EEG ohne weiteres sichtbaren galvanischen Hautreflex betrifft: er zeigt keine auffällige Korrelation zu den untersuchten Bewegungen; Ableitungen mit sichtbaren galvanischen Hautreflexen haben starke Kurvenschwankungen im Null-Versuch, die in guten Experimenten nicht vorkommen. Und was man vom Ablauf des galvanischen Hautreflexes weiß, paßt nicht zu den Potentialen bei Willkürbewegungen mit ihrem gleichmäßigen langsamen Anstieg vor und raschem Abfall mit kurzer Latenz nach der Bewegung. Vor allem aber haben wir identische Befunde bei Ableitung mit Klebeelektroden und mit Nadelelektroden, durch die Einflüsse des galvanischen Hautreflexes vermindert werden. Gegen den galvanischen Hautreflex als Ursprung des Bereitschaftspotentials sprechen ferner ähnliche langsam ansteigende negative Potentiale bei epiduralen und epicorticalen Ableitungen in Konditionierungsexperimenten<sup>14,15,19</sup> und an freibeweglichen Ratten<sup>4</sup>.

Die beiden *Hauptergebnisse* dieser Untersuchung sind das Oberflächen-negative *Bereitschaftspotential* vor Willkürbewegungen und *die weitgehende Übereinstimmung der späteren Potentialänderungen nach aktiven und passiven Bewegungen*.

Daß das *Bereitschaftspotential* in BATES<sup>2</sup> sorgfältiger Untersuchung trotz spezieller Fahndung mit langer Zeitkonstante unentdeckt blieb, lag wohl an der im Vergleich zur heutigen Computer-Technik unzulänglichen photographischen Methode. Übereinstimmung besteht zwischen dem Bereitschaftspotential und der an Ratten registrierten Negativierung der corticalen Gleichspannung, die oft vor Orientierungsbewegungen auftritt (CASPERS<sup>4</sup>). Eine Positivierung, wie CASPERS sie bei Putzbewegungen sah, konnten wir vor dem Beginn der Bewegung beim Menschen nicht feststellen. Die Positivierung vor der Handlung, von der wir nach unseren ersten Versuchen schrieben<sup>12</sup>, widerrufen wir hiermit.

Übereinstimmung besteht weiter zwischen dem Bereitschaftspotential vor Willkürbewegungen und WALTERS<sup>18</sup> negativer „*Erwartungswelle*“ zwischen konditionierendem und indikativem Reiz bei der Konditionierung von Reaktionen beim Menschen. Beide sind frontal stärker als occipital, beide sind bilateral kräftig ausgebildet, und beide hängen von der intentionalen Beteiligung ab. Vermutlich handelt es sich um einen ähnlichen neuronalen Prozeß. WALTER nimmt an, daß die Erwartungswelle oberflächlichen Schichten der Hirnrinde entspringt. Unterschiede bestehen vielleicht darin, daß die Bereitschaftswelle prä-

zentral größer als frontal und kontralateral zum bewegten Glied stärker als ipsilateral ist, doch muß die Erwartungswelle in dieser Hinsicht noch genauer untersucht werden. Ähnliche langsame, oberflächen-negative Hirnpotentialänderungen wurden früher in Konditionierungsversuchen an Kaninchen und Katzen bereits von SHVETS<sup>15</sup> sowie ROWLAND u. GOLDSTONE<sup>14</sup> gefunden. Die letzten Autoren stellten allerdings teils negative, teils positive Potentialänderungen im gleichen Zeitabschnitt zwischen konditionierendem Reiz und bedingter Reaktion fest, oft sogar vom selben Ableitungspunkt. Dies kann jedoch daran gelegen haben, daß ihre indifferente Elektrode im Sinus frontalis in Wirklichkeit different war.

Zur Terminologie: als Erwartungswelle können wir das negative Potential vor Willkürbewegungen nicht begreifen, denn es wird nichts erwartet; vielmehr scheint der bioelektrische Vorgang zu jenen Hirnprozessen zu gehören, die im Bewußtsein als *Bereitschaft zum Handeln* erscheinen. Vielleicht wäre auch für die Konditionierungssituation, die von WALTER u. Mitarb. untersucht wurde, „Bereitschaft“ richtiger als „Erwartung“, denn die Welle stellt sich nur dann ein, wenn die Versuchsperson auf den indikativen (zweiten) Reiz *handeln* soll, und ihr Auftreten ist mit einer Verkürzung der motorischen Reaktionszeit verbunden.

Vergleicht man die während und nach *Willkürbewegungen* auftretenden Hirnpotentiale mit den entsprechenden bei ähnlichen *passiven Bewegungen*, so sind die Übereinstimmungen bisher eindrucksvoller als die Unterschiede. Die Unterschiede betreffen im wesentlichen die ersten Potentiale nach Bewegungsbeginn. Sie sind in einzelnen Versuchen beträchtlich, aber im Ganzen vielfältig und inkonstant. Wir haben deshalb den Verdacht, daß sie auf kleinen Unterschieden in der Ausführung der Bewegungen oder sogar auf Artefakten beruhen könnten. (Wir hatten außer dem Elektromyogramm keine objektive Registrierung des Bewegungsablaufs.) BATES<sup>2</sup> Deutung der nach Bewegungsbeginn auftretenden Potentiale als refferent trifft also mindestens teilweise zu. Eine Beeinflussung der refferenten Ereignisse im Cortex durch den motorischen neuronalen Erregungsprozeß oder Folgen desselben (etwa im Sinne der „Efferenzkopie“ von VON HOLST u. MITTELSTAEDT<sup>9</sup>) läßt sich nach den bisherigen Befunden weder beweisen noch widerlegen. Die Unterschiede zwischen den frühen Hirnpotentialen nach aktiven und passiven Bewegungen bedürfen weiterer Untersuchung mit größerer zeitlicher Auflösung im Computer.

Es bleibt noch die Frage, ob die corticalen Ereignisse bei passiver Bewegung wirklich ganz passiv sind. Es wäre denkbar, daß an den passiven Bewegungen unserer Versuche ein aktives Nachgeben beteiligt war, in dem auch corticale Vorgänge eine Rolle spielen könnten. Dieser Verdacht liegt wenigstens bei rhythmischer Folge der passiven Bewegungen

nahe; denn dabei kann ein kleines Bereitschaftspotential vor der Bewegung auftreten. Jedoch zeigt ein Vergleich mit den evoked potentials auf elektrischen Reiz des Nervus medianus<sup>1,6-8,17</sup> ausreichende Übereinstimmung der cerebralen Potentiale nach passiver Handbewegung mit den späten bilateralen Potentialen nach Medianusreiz. Die frühen, fast nur kontralateralen Potentiale bei etwa 20 und 50 msec auf Medianusreiz sind zwar nach passiven Handbewegungen in unseren präzentralen Ableitungen nicht erkennbar, aber dies ist durch deren kurze Dauer (etwa 10 msec) und kleine Amplitude und durch die im Vergleich zum elektrischen Reiz geringe Synchronisierung der afferenten Erregung bei Handbewegung zu erklären. Aus diesem Vergleich ist also bisher nicht auf aktive corticale Komponenten in den Hirnpotentialen nach passiven Handbewegungen zu schließen.

Eine feste *Beziehung der Phase des Alpharhythmus zum Beginn der Willkürbewegungen*, wie BATES<sup>2</sup> sie in einem Teil seiner Versuche sah, konnten wir *nicht* feststellen. Sie hätte sich bei unserer Methode in einem Anwachsen der Alphaamplitude bei Bewegungsbeginn auf annähernd  $A_0N$  zeigen müssen, wenn wir die durchschnittliche Alphaamplitude im EEG  $A_0$  und die Zahl der summierten bewegungsgekoppelten Kurvenstrecken  $N$  nennen. Da BATES jeweils nur 20 Kurvenstücke überlagerte, die Phasenübereinstimmung nur in einem Fünftel seiner Versuche sah und den Zeitabschnitt der Gleichzeitigkeit nicht quantitativ definierte, ist die Möglichkeit zufälliger Entstehung seiner Befunde nicht auszuschließen. Die scheinbare Beziehung der Alphaphase zur Willkürbewegung, die sich in einigen unserer Versuche durch Alphablockierung vor und Wiedereinsetzen occipitaler Alphaspindeln während der Bewegung fand, weist vielleicht auf eine Wirkung der Bewegungsbereitschaft auf das Occipitalhirn und occipitale Entspannung bereits während der Bewegung hin, wogegen in der Präzentralregion während der Bewegung noch Alphablockierung herrscht (Abb. 6).

Herrn Dipl.-Phys. stud. med. PETER SCHEID danken wir sehr für tatkräftige Mitarbeit bei einem Teil der Versuche.

### Literatur

- <sup>1</sup> ALLISON, T.: Recovery functions of somatosensory evoked responses in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* **14**, 331 (1962).
- <sup>2</sup> BATES, J. A. V.: Electrical activity of the cortex accompanying movement. *J. Physiol. (Lond.)* **113**, 240 (1951).
- <sup>3</sup> BICKFORD, R. G., J. L. JACOBSON, and D. T. R. CODY: Nature of average evoked potentials to sound and other stimuli in man. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **112**, 204 (1964).
- <sup>4</sup> CASPERS, H.: Changes of cortical D.C. potentials in the sleep-wakefulness cycle. In: *The nature of sleep*. London: Churchill 1961.
- <sup>5</sup> CHATRIAN, G. E., M. C. PETERSEN, and J. A. LAZARTE: The Blocking of the rolandic wicket rhythm and some central changes related to movement. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* **11**, 497 (1959).



- <sup>6</sup> DAWSON, G. D.: Cerebral responses to electrical stimulation of peripheral nerve in man. *J. Neurol. Psychiat.* **10**, 137 (1947).
- <sup>7</sup> GIBLIN, D. R.: Somatosensory evoked potentials in healthy subjects and in patients with lesions of the nervous system. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **112**, 93 (1964).
- <sup>8</sup> GOFF, W. R., B. S. ROSNER, and T. ALLISON: Distribution of cerebral somatosensory evoked responses in normal man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* **14**, 697 (1962).
- <sup>9</sup> HOLST, E. VON, u. H. MITTELSTAEDT: Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften* **37**, 464 (1950).
- <sup>10</sup> JASPER, H., and W. PENFIELD: Electrocorticograms in man: Effect of voluntary movement upon the electrical activity of the precentral gyrus. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* **183**, 163 (1949).
- <sup>11</sup> KLASS, D. W., and R. G. BICKFORD: Observations on the rolandic arceau rhythm. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* **9**, 570 (1957).
- <sup>12</sup> KORNHUBER, H. H., u. L. DEECKE: Hirnpotentialänderungen beim Menschen vor und nach Willkürbewegungen, dargestellt mit Magnetbandspeicherung und Rückwärtsanalyse. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **281**, 52 (1964).
- <sup>13</sup> KRUGER, L., and C. HENRY: Electrical activity of rolandic region in unanesthetized monkey. *Neurology (Minneap.)* **7**, 490 (1957).
- <sup>14</sup> ROWLAND, V., and M. GOLDSTONE: Appetitively conditioned and drive-related bioelectric baseline shift in cat cortex. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* **15**, 474 (1963).
- <sup>15</sup> SHVETS, T. B.: Conference on electrophysiology of higher nervous activity. Abstracts, Moskau 1958, p. 138. Zitiert nach V. S. RUSINOV: General and localized alterations in the electroencephalogram during the formation of conditioned reflexes in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol. Suppl.* **13**, 309 (1960) (Moscow Colloquium).
- <sup>16</sup> TAYLOR, E. H., and W. S. HAUGHTON: Some recent researches on the topography of the convolutions and fissures of the brain. *Trans. roy. Acad. Med. Ireland* **18**, 511 (1900).
- <sup>17</sup> UTTAL, W. R., and L. COOK: Systematics of the evoked somatosensory cortical potential: a psychophysical-electrophysiological comparison. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **112**, 60 (1964).
- <sup>18</sup> WALTER, W. G.: Slow potential waves in the human brain associated with expectancy, attention and decision. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* **206**, 309 (1964).
- <sup>19</sup> — R. COOPER, V. J. ALDREDGE, W. C. MCCALLUM, and A. L. WINTER: Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature (Lond.)* **203**, 380 (1964).

Dozent Dr. H. H. KORNHUBER,

Neurologische Klinik und Abteilung für Neurophysiologie der Universität  
78 Freiburg i. Br., Hansastrasse 9a, z. Zt. Dpt. of Physiology/Johns Hopkins  
University Med. School 725 N Wolfe Str., Baltimore 5 Md. 21 205, USA