



*Ausgabe 16 (Juni 2010), S. 6 - 9*

Wascher, E. u. Hoffman, S.

Elektrophysiologie in der Ergonomie

# Elektrophysiologie in der Ergonomie: Möglichkeiten und Grenzen

Aufnahme und Verarbeitung von Informationen und deren Umsetzung in eine adäquate Handlung sind zentrale Determinanten für eine fehlerfreie und effiziente Interaktion an jeder Mensch-Maschine Schnittstelle. Mit den Methoden von Ergonomie und Psychologie lässt sich dieses System nur von Außen beobachten, d.h. über experimentelle Variation wird der Signaleingang variiert und das Verhalten wird als Output beobachtet bzw. gemessen. Die einzelnen Prozesse der Informationsverarbeitung bleiben dabei in der „Black-Box“ Mensch verborgen. Moderne neurowissenschaftliche Methoden ermöglichen einen Einblick in den Ablauf der Prozesse beim gesunden Menschen und sind damit unverzichtbare Informationsquellen jeder Kognitionsforschung. Peripherphysiologische Maße (z.B. Hautleitfähigkeit oder Herzrate) liefern Informationen vor allem über die Wirkung von Belastungsfaktoren, bildgebende Verfahren (z.B. fMRT oder PET) über die funktionale Vernetzung von Hirnregionen. Die zeitliche Struktur kognitiver Prozesse lässt sich jedoch nur mit dem Elektroenzephalogramm (EEG) messen, welches damit die zentrale Methode mentaler Zeitmessung jenseits des Verhaltens darstellt.

## Grundprinzipien des EEG

Das EEG erfasst kontinuierlich die Aktivität größerer Netzwerke von Nervenzellen. Diese immer aktiven Zellverbände stellen die Grundlage jeglicher Informationsverarbeitung dar. Das Besondere am EEG ist, dass sich bei der Einwirkung eines Reizes oder in Vorbereitung auf eine Reaktion das Muster der Aktivität systematisch verändert. Ausprägung und Zeitfaktoren derartiger reiz- bzw. reaktionskontingenter EEG-Veränderungen lassen sich durch einfache statistische Methoden vom Spontansignal trennen. Dabei wird die Aktivität in einer möglichst großen Anzahl an Durchgängen erfasst und in Bezug auf eine interessierende experimentelle Bedingung (Ereignis) gemittelt. Das dadurch

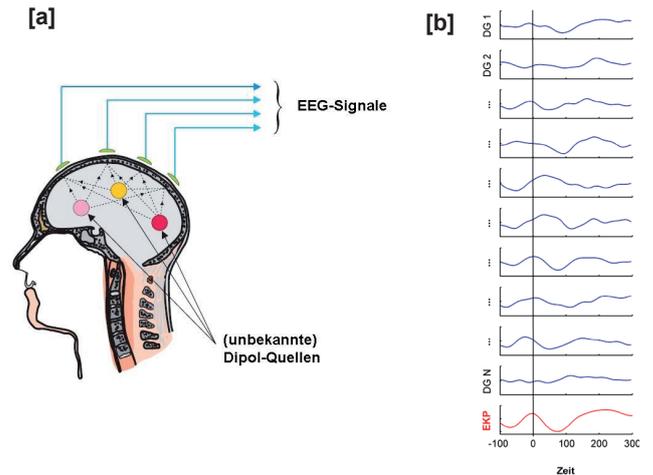


Abb. 1: [a] Schematische Darstellung der Signalquellen und Entstehung der EEG-Signale (modifiziert aus Choi et al., 2005). Das EEG-Signal an einer Elektrode stellt eine Signalmischung verschiedener Quellen dar. Somit ist das EEG-Signal nicht eindeutig, d.h. es kann auf verschiedene Quellen zurückzuführen sein. Entscheidend sind der Abstand, die Ausrichtung und die relative Projektionsstärke zu einer Elektrode, um zuverlässig vom EKP auf die Quelle zu schließen.

[b] Schematische Darstellung der Berechnung des Ereigniskorrelierten Potentials. Der Versuchsperson wird wiederholt eine Versuchsbedingung (Ereignis) dargeboten (Durchgang (DG) 1 bis N). In Bezug auf diese Versuchsbedingung (hier Zeitpunkt 0) wird der Mittelwert jedes Zeitpunktes aus allen Versuchsdurchgängen berechnet. Dies ergibt das Ereigniskorrelierte Potential (EKP).

entstehende ereigniskorrelierte Potenzial (EKP) enthält nur noch systematisch auftretende Aktivitäten, da unsystematische Aktivität sich durch die Mittelung aufhebt. Dieses EKP lässt sich über die Amplitude und die Latenz einzelner Gipfel im Kurvenverlauf charakterisieren, welche Aussagen über diskrete Informationsverarbeitungsprozesse liefern.

## Spezifische Umsetzung

Im Bereich der Altersforschung wird diese Methode schon lange am *IfADo* eingesetzt. Ziel dabei ist es, kognitive Veränderungen im Alter nicht nur in deren Ausprägung zu beschreiben, sondern auch die Ursachen besser erfassen zu können. So nutzt die Arbeitsgruppe rund um



Michael Falkenstein das EKP zur Identifizierung der kognitiven Mechanismen, welche vom Alterungsprozess betroffen sind (exekutive Kontrolle, Arbeitsgedächtnis) und zur Feststellung, in welchen Bereichen das Altern einen nur geringen Einfluss hat (sensorische Prozesse). In ähnlicher Weise wird das EKP bei der Untersuchung der kognitiven Belastung durch Schichtarbeit oder durch olfaktorische Einflüsse eingesetzt.

Die zentrale Einheit „Wahrnehmungskybernetik“ nutzt diese Methode, um die Voraussetzungen bewusster Verarbeitung besser verstehen zu können. Gerade in diesem Bereich zeigen sich allerdings Grenzen des EKP, das sich nur über eine sehr große Anzahl von vergleichbaren Durchgängen ermitteln lässt. Das Bewusstwerden eines Reizes ist jedoch mit der kontinuierlichen Vertiefung von Information verbunden, deren Repräsentation im EEG zwischen einzelnen Durchgängen sehr variabel ist, während sich dies nicht unbedingt unmittelbar im Verhalten niederschlägt. Die Nuancen, die einen „erlebten“ von einem versäumten Reiz unterscheiden, gehen in der Mittelung unter und lassen sich somit mit dem EKP nicht einschätzen.

### Vertiefte Methoden: ICA

Um also der Informationsverarbeitung zu jedem gegebenen Zeitpunkt zwischen Reiz und Reaktion nahe zu kommen empfiehlt es sich, das Signal in jedem einzelnen Durchgang detailliert beurteilen zu können. Dies stellt allerdings ein signaltheoretisches Problem dar, da das erfasste Signal auf dem Skalp eine Signalmischung aus verschiedensten Quellen darstellt. So deutet sich im EKP selbst bereits oft die Überlagerung von Subkomponenten an. Darüber hinaus ist die Signalstärke der oben genannten Spontanaktivität oft deutlich höher als das Signal einzelner EKP-Komponenten.

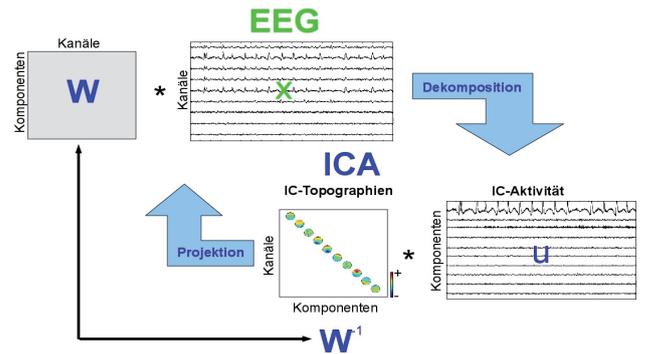


Abb. 2: Analyseschritte einer ICA mit EEG-Daten (modifiziert aus Makeig & Onton, 2009). Nach Schätzung der „Entmischungsmatrix“  $W$  wird das EEG-Signal über die lineare Transformation  $u=Wx$  (wobei  $x$  transponiert wird) dekomponiert (Dekomposition). Die erhaltenen unabhängigen Komponenten ( $u$ ) bilden die Aktivität der im EEG enthaltenen Komponenten ab. Die Inversion der Entmischungsmatrix ( $W^{-1}$ ) stellt die relativen Projektionsstärken der Komponenten auf die Kopfoberfläche dar. Über diese lassen sich die Quellen der Komponenten über entsprechende Algorithmen schätzen (z.B. sLORETA). Zur Artefaktkorrektur werden z.B. die Artefaktkomponenten auf Null gesetzt und man erhält über die (Rück-) Projektion  $x'=W^{-1}u$  einen bereinigten Datensatz. So stellt z.B. die erste Komponente (die erste IC-Aktivität und die korrespondierende erste Topographie oben links bei den IC-Topographien) deutlich ein Augenbewegungsartefakt des Bulbus dar. Entsprechend lässt sich ereignisbezogene Aktivität behandeln, indem man nur die Komponenten beibehält, welche mit dem interessierenden Ereignis korrelieren bzw. variieren.

Eine zentrale methodische Herausforderung ist daher die Separierung der Komponenten, welche die Verarbeitung der Information am besten beschreiben. Ein Ansatz zur Differenzierung von EKP-Subkomponenten sind Verfahren der multivariaten Statistik, die auf dem Prinzip der blinden Quellentrennung basieren. Diese gehen von der Annahme aus, dass das EEG-Signal aus nicht direkt beobachtbaren, latenten Variablen (den kortikalen Quellen und anderer Aktivität, z.B. Artefaktaktivität) konstituiert wird. Das Ziel dieser Verfahren hinsichtlich des EEG ist die Dekomposition der an allen Elektroden gemessenen Signale in *räumlich* und *zeitlich* unabhängige Komponenten. Diese Komponenten haben ihren Ursprung in räumlich fixierten Netzwerken im Gehirn oder in Quellen, welche außerhalb des Gehirns liegen (wenn es sich z.B.



um Artefakte handelt). Kurz: Es wird postuliert, dass das beobachtete EEG-Signal an jeder Elektrode eine lineare Mischung unbekannter kortikaler und nicht-kortikaler Aktivität darstellt.

Der aktuell populärste Ansatz zur Quellentrennung ist die *Independent Component Analysis* (ICA). Angenommen, es werden eine Anzahl von Signalen ( $x$ ) aufgezeichnet (z.B. EEG-Signale), so ergibt sich das Problem, dass die zugrunde liegenden Quellen ( $s$ ) dieser Signale unbekannt sind. Das resultierende Signal ( $x$ ) stellt eine Mischung ( $A$ ) dieser Quellsignale ( $s$ ) dar. Das Ziel der Analyse ist die Schätzung der unbekanntes Mischungsmatrix und der Quellsignale. Ziel der ICA ist es die Mischungsmatrix so zu schätzen, dass die Signale möglichst unabhängig voneinander sind.

Die ICA ist in der Lage, die von einer großen Anzahl an Elektroden auf dem Skalp aufgenommene Aktivität in räumlich fixierte und zeitlich möglichst unabhängige Komponenten (ICs) zu trennen, deren Mischung die beobachteten Signale erzeugt. Dies kann geschehen ohne a priori Annahmen über die Dynamik oder räumliche Struktur der getrennten Komponenten zu machen. Da der Zeitverlauf der Aktivität dieser Komponenten relativ unabhängig voneinander ist, müssen die sie generierenden Strukturen physiologisch zugeordnet werden können. Folglich sollte die ICA in der Lage sein, das EEG in physiologisch und funktional trennbare Quellen zu zerlegen.

Durch die quellenbasierte Zerlegung des gemessenen Signals in diskrete Anteile lassen sich in jedem einzelnen Durchgang kognitive Subprozesse messen, da die Überlagerung durch nicht relevante Signale entfernt worden ist. Auch lassen sich generell Artefakte im Signal relativ leicht identifizieren und entfernen (so hat Sven Hoffmann aus dem *IfADo* gezeigt, dass man Artefakte, die durch Augenbewegungen entstehen, mit der ICA effektiv aus dem EEG entfernen kann). Damit scheint diese Methode auch

im Kontext der Anwendungsforschung, wo es in der Situation bedingte Einschränkung in den experimentellen Möglichkeiten gibt, sehr vielversprechend. Allerdings entstehen hinsichtlich der Verwendung der ICA zurzeit noch einige Probleme theoretischer Natur. Nach dem hier vorgestellten Modell dekomponiert das Verfahren das EEG-Signal in so viele Komponenten wie Elektroden existieren. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass dem EEG auch mehr Quellen zu Grunde liegen können, als mit einer entsprechenden ICA extrahiert werden können. Vor allem ist die „wahre Anzahl“ der Quellen unbekannt. Deshalb ist es empfehlenswert möglichst viele Elektroden zu applizieren, um die Dimensionalität des Signals adäquat zu erfassen, womit sich aber der Aufwand für die Messung enorm erhöhen kann. Besonders vielversprechend sind im Anwendungskontext „Online“-ICA Verfahren, welche das Signal während der Erfassung bereits dekomponieren. Hier gibt es bereits Arbeitsgruppen, welche so ein Verfahren im Kontext von Brain Computer Interfaces evaluieren.

## Diskussion und Ausblick

Informationsverarbeitung ist ein zentrales Thema moderner Ergonomie. Belastung am Arbeitsplatz ist nicht mehr allein durch das Ausmaß körperlicher Anstrengung, sondern immer häufiger durch die Menge an Informationen, die verarbeitet werden müssen, definiert. Weder die Frage, warum ein Fluglotse eine gefährliche Situation übersieht oder warum ein Autofahrer durch das Telefonieren am Steuer in seiner Aufmerksamkeit beeinträchtigt ist, noch die Frage, warum ältere Menschen manche Informationen langsamer verarbeiten und ob sie aus diesem Grunde mit modernen technischen Schnittstellen (wie zum Beispiel dem Computer) Probleme haben, lässt sich über Verhaltensbeobachtung alleine beantworten. Das EEG gibt die Möglichkeit „dem Denken beim Arbeiten zuzuschauen“. Diese Methode erlaubt es, die Informationsver-



arbeitung in einzelne Verarbeitungsstufen zu zerlegen und deren zeitlichen Ablauf in höchster zeitlicher Auflösung zu erfassen. Die traditionelle Nutzung des EEG in Form von EKPs (Mittelung, welche Spontanaktivität von ereigniskorrelierter Aktivität trennt), lässt eine gute Schätzung der Effizienz der Informationsverarbeitung bei einer entsprechend großen Anzahl an Durchgängen zu. Das EKP lässt sich somit als Messung von Informationsverarbeitungsprinzipien hervorragend einsetzen.

Zur detaillierten Messung der Informationsverarbeitung in einem einzelnen Versuchsdurchgang eignet sich diese Methode allerdings nur bedingt. Hierzu muss das gemessene Signal (das immer ein Mischsignal mit einer großen Anzahl an eingehenden Quellen ist) vorerst zerlegt werden. Die dazu verwendete Independent Component Analysis (ICA) hat in der Grundlage schon eine gewisse Verbreitung gefunden und wird am *IfADo* zur Zeit gezielt hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in der anwendungsnahen Forschung evaluiert.

Weitere aktuelle Entwicklungen in der EEG-Forschung, wie die Messung von Gamma-Oszillationen oder die kombinierte Messung von EEG und fMRI, sind aufgrund des technischen Aufwandes und der noch geringen Befundlage für die anwendungsnahe Forschung weniger interessant, werden aber trotzdem von Arbeitsgruppen aus dem *IfADo* in Zusammenarbeit mit umliegenden Institutionen (Universitätsklinikum Münster, Universität Oldenburg) betrieben, vor allem um grundlegende Mechanismen der Informationsverarbeitung weiter aufklären zu können.

*Edmund Wascher  
Sven Hoffmann*

