

FAEP: Peak-Bestimmung mit automatischer Einschätzung der Zuverlässigkeit

Justus Piater, Hellmut von Specht, Franz Stuchlik, Roland Mühler

Zusammenfassung Auditorisch Evozierte Potentiale werden bisher fast ausschließlich durch menschliche Experten visuell ausgewertet. Vorschläge zur computergestützten Auswertung beschränken sich meist auf die signaltheoretische Erkennung eines Potentials oder die Zuordnung von Peaks in gut ausgeprägten Kurven.

Hier wird ein Verfahren zur automatischen Peak-Bestimmung vorgestellt, das auf den wichtigsten Kriterien beruht, die auch von Menschen angewandt werden. Diese Kriterien werden durch unscharfe Operationen miteinander kombiniert, wobei das Abwägen verschiedener Fakten durch den Menschen im Computer näherungsweise nachvollzogen wird.

Verschiedene Systemparameter werden in einer Initialisierungsphase anhand einer Menge visuell ausgewerteter Trainingsdaten voreingestellt. Dadurch ist es möglich, das Verhalten bestimmter Auswerter nachzubilden bzw. das System im Blick auf bestimmte Problemstellungen zu optimieren.

Das Verfahren schätzt die Zuverlässigkeit der von ihm selbst getroffenen Zuordnungen ein. Bewertet werden sowohl die einzelnen Peaks als auch die gesamte Zuordnung. Sehr unsichere Peaks sollen nicht zugeordnet werden. Hier treten jedoch bei insgesamt sehr schwach ausgebildeten Potentialen noch Probleme auf.

*Schlüsselwörter: frühe auditorisch evozierte Potentiale;
automatische Peak-Bestimmung;
Zuverlässigkeit;
unscharfe Mengen*

BAEP: Peak identification with automatic assessment of reliability

Summary *So far, Brainstem Auditory Evoked Potentials (BAEP) are almost always visually evaluated by human experts. Suggestions of computer based methods have mostly been restricted to application of signal detection theory to an evoked potential, or the assignment of peaks in clearly shaped curves.*

This article proposes a method for automatic peak identification, which is based on major criteria applied by human evaluators, namely shape (as represented by the first and second derivatives), downslope following peak V, coincidence of ipsi- and contralateral peak V latencies, inter-peak latencies and absolute latencies. These criteria are combined using fuzzy logic operations, thus reflecting the weighting of different facts by humans.

In an initialisation phase, various system parameters are determined with respect to a visually evaluated set of training data. Hence, it is possible to adjust the system to the behaviour of certain evaluators, or to optimize the system for operation on particular problems.

Peak identification is accomplished in two steps: First, five sets of candidates are compiled, each set consisting of samples qualified for one of peaks I through V, respectively. Second, the best combination of candidates, none or one from each set, is determined with respect to the latency criteria.

The method is based on degrees of satisfaction which indicate the degree to which a sample satisfies a given criterion. The computations thus result in degrees of reliability, representing the system's own assessment of the reliability of the final peak assignment as a whole (Total Assessment), as well as of the up to five separate peaks (Peak Assessment). Very poorly distinguished peaks are not to be assigned at all.

Tests on a large set of clinical data showed the high performance of this system on good and average curves. A substantial drawback is the assignment of too many peaks in poor curves.

Keywords: *Brainstem Auditory Evoked Potentials;
Automatic Peak Identification;
Reliability;
Fuzzy Sets*

1. Einleitung

Gegenwärtig werden FAEP in der Regel durch Experten visuell ausgewertet. Grundlage ist deren Erfahrung in der Deutung von Potentialverläufen. Abb. 1 zeigt ein gut ausgeprägtes ipsi- und contralateral registriertes FAEP mit markierten Peaks. Im Mittelpunkt der Auswertung stehen im allgemeinen die Latenzen der Peaks I – V.

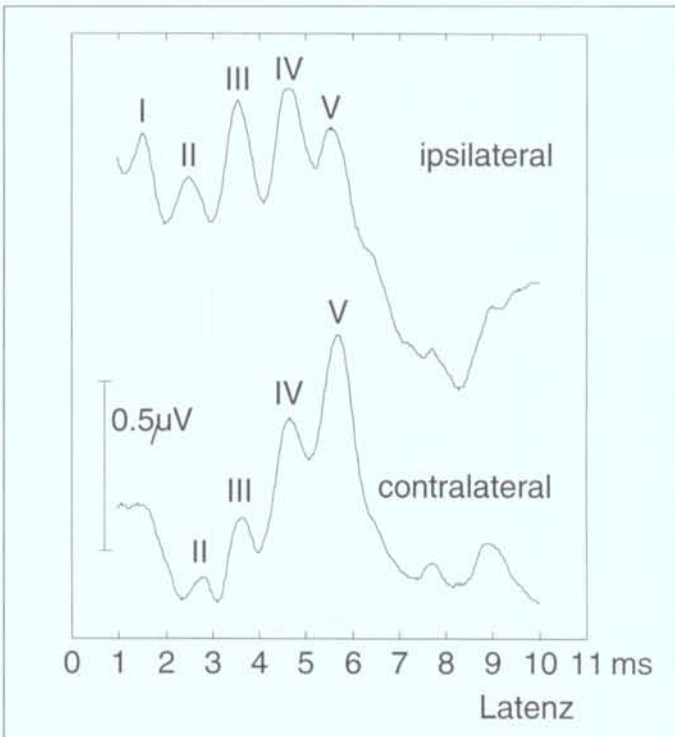


Abb. 1: Sehr gut ausgeprägtes FAEP. Die ipsilateralen (I-V) und contralateralen (II-V) Peaks sind deutlich erkennbar

Fig. 1: Very distinctly shaped BAEP. The ipsi- (I-V) and contralateral (II-V) peaks are clearly distinguished

Um eine größere Objektivität der Auswertung zu erreichen, wurden in den letzten Jahren etliche computergestützte Auswertungsverfahren vorgeschlagen. Die meisten dieser Arbeiten behandeln eine der beiden zentralen Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit der Auswertung von FAEP, nämlich (a) die Erkennung eines evozierten Potentials (siehe z. B. Woodworth et al., 1983; Bachen, 1986; Sininger, 1993) oder (b) die Peak-Bestimmung (Freeman, 1992; Madhavan et al., 1986; Pratt et al., 1993; Grönfors, 1993).

Bei der Entwicklung des vorliegenden Peak-Bestimmungs-Systems wurden folgende Ziele anvisiert:

- Berücksichtigung von Zusammenhängen, wie sie auch von menschlichen Experten zugrundegelegt werden,
- automatische Einschätzung der Zuverlässigkeit, mit der die Peaks bestimmt wurden,
- damit auch eine verbesserte Erkennungsrate bei schlecht ausgeprägten Potentialen, sowie
- Adaptabilität bzw. Trainierbarkeit des Algorithmus.

Während die meisten bisher vorgeschlagenen Verfahren auf traditionellen Methoden der Signalverarbeitung beruhen, basiert der hier vorgestellte Peak-Bestimmungs-Algorithmus auf der subjektiven Vorgehensweise von Experten. Er beinhaltet eine Auswahl von Regeln, wie sie in ähnlicher Form auch vom Menschen angewendet werden. Sie sind fester Bestandteil des Algorithmus und werden nicht verändert. Kombiniert werden sie durch parametrisierte *unscharfe Mengenoperatoren*, die in einer Initialisierungsphase angepaßt werden. Hierin liegt die *Adaptabilität* des Algorithmus. Ein Überblick über das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Systems findet sich in Abb. 2.

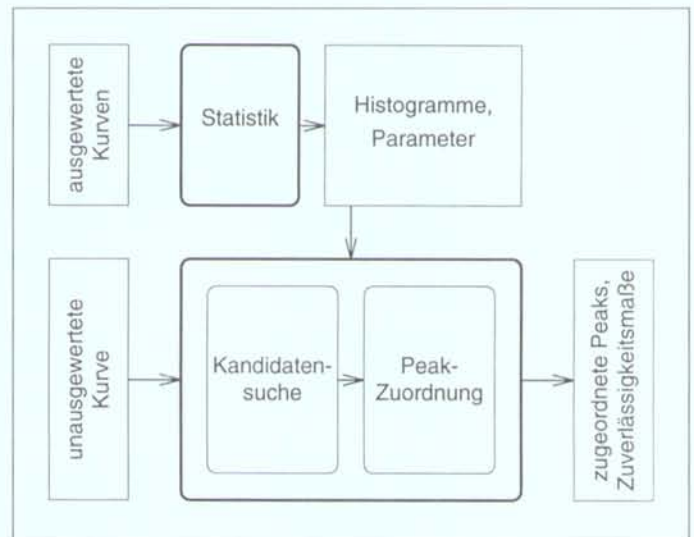


Abb. 2: Komponenten des Peak-Bestimmungs-Systems. In der oberen Hälfte ist die Abstimmung der Parameter dargestellt, in der unteren der Vorgang der Peak-Bestimmung

Fig. 2: Components of the Peak Identification System. The upper half represents the parameter initialization, the lower the peak identification procedure

2. Vorgehensweise

Im folgenden werden die implementierten Regeln informell vorgestellt. Die zugrundegelegten Kriterien sind kursiv hervorgehoben:

1. Ein Peak ist anhand seiner *Form* erkennbar (z. B. Maximum).
2. Peak V ist oft durch einen folgenden *Steilabfall* gekennzeichnet.
3. Analog ist Peak V häufig auch auf der contralateralen Seite gut erkennbar, und zwar bei guter *Übereinstimmung* der Latenzen.
4. Die Peaks wahren gewisse *Abstände* untereinander.
5. Die Peaks treten in typischen *Latenzbereichen* auf, die vom Reizpegel abhängen.

Keine dieser Regeln kann, für sich allein genommen, einen Peak eindeutig identifizieren. Sie müssen *gewichtet* miteinander *kombiniert* werden.

Im allgemeinen erfüllt ein betrachteter Abtastpunkt l eines gemittelten FAEP das Kriterium C_i in einer Regel i mit einem *Erfüllungsgrad* $\eta_i(l)$, der zwischen »vollständig« und »gar nicht« liegen kann. Ähnlich wie ein Experte berücksichtigt der vorgestellte Algorithmus die Erfüllungsgrade aller Regeln, um die *Eignung* $\theta(l)$ eines Abtastpunktes als Peak zu ermitteln.

Der Bestimmung der Erfüllungsgrade η_i wurde folgende Annahme zugrundegelegt:

Je häufiger (seltener) bestimmte Eigenschaften bei visuell bestimmten Peaks vertreten sind, desto besser (schlechter) erfüllen diese Eigenschaften das betrachtete Kriterium.

Typische Eigenschaften werden also mit *guten* Eigenschaften im Sinne des betrachteten Kriteriums gleichgesetzt. Diese Annahme hat sich mit Ausnahme des Form-Kriteriums als hinreichend zutreffend erwiesen. Für das Form-Kriterium waren spezielle Maßnahmen erforderlich, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Von Kriterien zu unscharfen Mengen

Es folgt eine Beschreibung der implementierten Kriterien. Die Peaks I, III und V sind in der Regel am deutlichsten ausgeprägt und tragen auch die größte diagnostische Relevanz. Sie haben in dem vorgestellten Algorithmus ein besonderes Gewicht und werden hier *Haupt-Peaks* genannt. Peaks II und IV heißen *Neben-Peaks*.

Form

Die Form wird durch die Werte der ersten beiden Ableitungen an der betrachteten Stelle l wiedergegeben. Da die einzelnen Peaks verschiedene typische Formvarianten haben, wird dieses Kriterium für jeden Peak getrennt berechnet.

Steilabfall

Der am stärksten ausgeprägte Steilabfall einer Kurve liegt meist unmittelbar hinter Peak V. Diese Tatsache ist für den Experten bei der Identifizierung von Peak V von großer Bedeu-



Abb. 3: Definition des Steilabfalls nach Peak V in einem FAEP

Fig. 3: Definition of the downslope after peak V of a BAEP. Indicated are a sample and the length of the corresponding downslope

tung und wird deshalb auch in den vorliegenden Algorithmus einbezogen. Die hier zugrundegelegte Definition des Steilabfalls wird in Abb. 3 veranschaulicht.

Ipsi-/contralaterale Übereinstimmung

Ein weiteres wichtiges Merkmal zur Identifikation von Peak V ist die Erkennbarkeit von Peak V im contralateralen Potentialverlauf. Er hat meist eine gut übereinstimmende, oft geringfügig größere Latenz. Die typische Latenz-Differenz zwischen den Peaks V auf beiden Seiten wird durch das hier beschriebene Kriterium erfaßt.

Das Histogramm in Abb. 4 gibt die erfaßten typischen Abstände wieder.

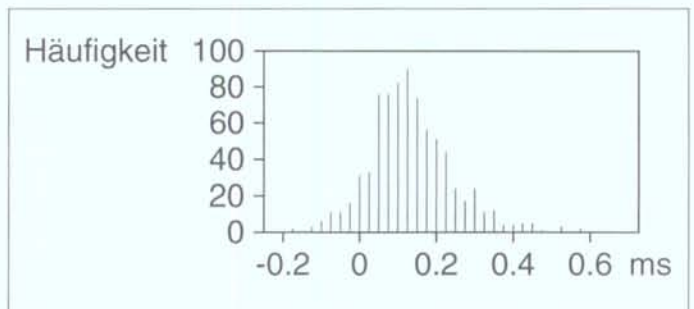


Abb. 4: Histogramm der Latenz-Abweichungen des contralateralen vom ipsilateralen Peak V

Fig. 4: Histogram showing the difference of the contralateral from the ipsilateral peak V latency

Abstände

Die Abstände der Peaks untereinander sind ein wichtiges Kriterium für ihre Identifikation. Diese Abstände sind unabhängig vom Reizpegel (siehe z. B. von Specht und Kraak, 1990).

Hier werden für jeden Peak die Abstände zu zwei bestimmten anderen Peaks berücksichtigt, die hier als *Referenz-Peaks* bezeichnet werden. Für einen Neben-Peak dienen die beiden benachbarten Haupt-Peaks als Referenz-Peak, für einen Haupt-Peak die beiden anderen Haupt-Peaks.

Latenz

Im Gegensatz zu den Inter-Peak-Latenzen sind die Absolut-Latenzen pegelabhängig. Deshalb wurde hier der Pegel als Parameter durch eine Regressionsrechnung eliminiert. Dabei wurde über den Trainingsdaten die Latenz l_v von Peak V als Funktion des Reizpegels durch eine Exponentialfunktion approximiert.

Auf dieser Basis wurde eine neue Größe *Plat* (für »Pegel-Latenz«) als Funktion von Pegel p und Latenz l eingeführt:

$$\text{Plat}(p, l) = l - k_1 e^{k_2 p} + k_3 \quad (1)$$

Bei der automatischen Peak-Bestimmung wird dieses Plat-Kriterium anstelle der Latenzen verwendet.

Berechnung der Erfüllungsgrade

Das Peak-Erkennungssystem arbeitet in zwei Phasen. Als Beispiel für das praktische Vorgehen wird im folgenden das Plat-Kriterium für Peak V betrachtet.

In der *Initialisierungsphase* wird für alle im Trainingssatz enthaltenen Kurven die Latenz des Peaks V, falls vorhanden, in den Plat-Wert umgerechnet. Dieser Wert wird in ein Histogramm eingetragen, wobei das betrachtete Universum von Plat-Werten in Intervalle eingeteilt wird (Abb. 5).

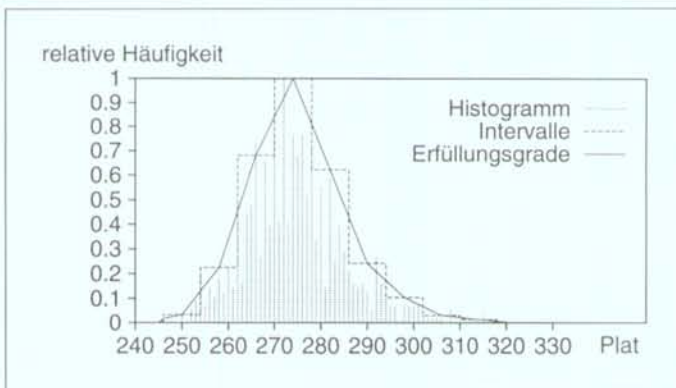


Abb. 5: Vom Histogramm zum Erfüllungsgrad eines Kriteriums (Beispiel: Lage-Kriterium von Peak V anhand der Plat-Werte). Dargestellt ist das normalisierte Histogramm, die Einteilung in Intervalle (Rechteck-Graph) sowie das geglättete Histogramm, das unmittelbar die Erfüllungsgrade des Plat-Kriteriums repräsentiert

Fig. 5: From a histogram to the degree of satisfaction of a criterion (example: Peak V Latency). The normalized histogram, its subdivision into intervals (rectangular graph) and the smoothed histogram representing the degrees of satisfaction are shown

Soll dann in der *Arbeitsphase* bei einer unbekanntenen Kurve für einen Abtastpunkt l berechnet werden, inwieweit er das Latenz-Kriterium erfüllt, so wird wiederum als erstes der zugehörige Plat-Wert P_l ermittelt. Der Erfüllungsgrad η des Plat-Kriteriums wird aus dem (auf $[0,1]$ normalisierten) Histogramm abgelesen. Zwischenwerte zwischen benachbarten Intervallen werden linear interpoliert (siehe Abbildung 5).

3. Peak-Bestimmung

Die Peak-Bestimmung (Arbeitsphase) wird in zwei Schritten durchgeführt: Zunächst wird für jeden Abtastpunkt l einzeln berechnet, zu welchem Grad $\theta_k(l)$ er als Peak *geeignet* ist. Dabei werden Abstands- und Plat-Kriterien noch nicht berücksichtigt. Ein l mit $\theta_k(l) > 0$ heißt *Peak-Kandidat*. Im zweiten Schritt werden verschiedene Kombinationen von Kandidaten gebildet, wobei alle Kriterien berücksichtigt werden und in die neuen Eignungswerte $\theta_p(l)$ einfließen. Aus diesen Peak-Eignungswerten $\theta_p(l)$ werden die Eignungen $\theta(Z)$ der Kombinationen Z als endgültige *Zuordnung* ermittelt.

Diese Vorgehensweise wird im folgenden näher erläutert.

Bestimmung der Peak-Kandidaten

Für jeden der Peaks I – V wird eine eigene Kandidatenliste erstellt. Dazu wird das FAEP jeweils Abtastpunkt für Abtastpunkt durchgegangen. Für jeden Abtastpunkt l wird die Eignung $\theta_k(l)$ als Peak berechnet. Das Ergebnis ist eine Eignungs-Verteilung über den Latenzen. Von dieser Verteilung werden nur lokale *Maxima* betrachtet, deren Eignungsgrad oberhalb einer Schwelle liegt.

Damit ist die Zusammenstellung der Kandidaten für die Peaks I – IV beendet. Die Eignungswerte der Kandidaten für Peak V werden darüber hinaus mit der Ausprägung des Steilabfalls verrechnet. Ferner wird ihre Übereinstimmung mit einem contralateralen Peak V eingerechnet. Dazu wird auf die gleiche Weise eine Kandidatenliste für Peak V auf der contralateralen Seite zusammengestellt. Dann wird für jeden ipsilateralen Kandidaten der beste contralaterale Kandidat bestimmt und ihre Übereinstimmung berechnet. Für die endgültige Bewertung des Kandidaten ist dabei die bessere der beiden Seiten ausschlaggebend.

Zusammengefaßt lautet die (durch unscharfe Operatoren realisierte) Regel für die Bewertung der Kandidaten für Peak V wie folgt:

Ein Abtastpunkt l ist genau dann ein guter Peak-Kandidat (großes θ_k), wenn *Form und Steilabfall* entweder auf der ipsi- oder der contralateralen Seite gut sind, *und* wenn die *Latenzen* der betreffenden ipsi- und contralateralen Peaks gut übereinstimmen.

Bestimmung der besten Zuordnung

Aus den Kandidatenlisten für die Peaks I – V wird die beste Peak-Zuordnung nach folgendem (hier vereinfacht dargestelltem) Schema ermittelt:

1. Nacheinander werden alle möglichen Kombinationen von Kandidaten für die Haupt-Peaks gebildet. In deren Eignungsgrade θ_p wird die Eignung der Abstände zu den beiden Referenz-Peaks eingerechnet.

Für jede Kombination werden die folgenden Schritte ausgeführt:

(a) Die besten Kandidaten für die Neben-Peaks werden ausgewählt. Dabei werden in deren Eignungsgrade θ_p die Abstände zu den beiden jeweiligen Nachbarn (Haupt-Peaks) eingerechnet.

(b) Die Eignung θ der so gebildeten Peak-Kombination als Zuordnung wird als gewichteter Mittelwert der Peak-Eignungen θ_p berechnet.

In die Zuordnungs-Eignung wird ferner die Lage der Kandidaten auf der Zeitachse eingerechnet.

2. Anschließend werden alle Zuordnungen nach der Zuordnungs-Eignung θ sortiert.

Vereinfacht formuliert, wird die Peak-Eignung folgendermaßen berechnet:

Ein Kandidat l ist genau dann gut als Peak geeignet (großes $\theta_p(l)$), wenn er ein guter Kandidat ist (großes $\theta_k(l)$) und die Abstände zu den Referenz-Peaks gut sind.

In diese Beschreibung nicht einbezogen wurden verschiedene Mechanismen, die dafür sorgen, daß sehr undeutlich ausgeprägte oder nicht zu identifizierende Peaks gar nicht zugeordnet werden.

4. Leistungsbewertung

Um ein automatisches Peak-Zuordnungs-System zu beurteilen, müssen dessen Zuordnungen mit denen menschlicher Experten verglichen werden.

Als Referenz- und Testdaten dienten 895 visuell ausgewertete Kurven von 143 normalhörenden und hörgeschädigten Patienten. Die Potentiale wurden mittels eines kommerziellen ERA-Meßplatzes mit den folgenden Parametern erfaßt:

Stimulus: Rechteck (Sog), Breite 100 μ s
 Stimulus-Rate: 18 Hz
 Artefaktschwelle: 10 μ V
 Elektroden: Vertex (positiv), Mastoid (negativ), Stirn (Masse)
 Digitalisierung: 40 kHz, 0.95 – 14.95 ms post-Stimulus

In jeder Kurve aus dem Trainingssatz waren bis zu fünf ipsilaterale Peaks im Sinne der Aufgabenstellung durch Fachleute bestimmt worden. Ein solcher Peak wird hier als *vorgegeben* bezeichnet, ein visuell nicht vorbestimmter Peak entsprechend als *nicht vorgegeben*.

Ein bei der automatischen Peak-Bestimmung ermittelter Peak wird hier als *bestimmt* bezeichnet, ein durch den Algorithmus nicht zugeordneter Peak als *nicht bestimmt*.

Werden nun die bestimmten mit den vorgegebenen Peaks verglichen, dann fällt jeder der fünf möglichen Peaks einer Kurve in genau eine der folgenden *Bestimmungs-Kategorien*:

1. *korrekt*: vorgegeben und korrekt bestimmt
2. *korrekt nicht bestimmt*: nicht vorgegeben und nicht bestimmt
3. *überbestimmt*: nicht vorgegeben, aber bestimmt
4. *unterbestimmt*: vorgegeben, aber nicht bestimmt
5. *falsch*: vorgegeben und falsch bestimmt

Die Parameter der unscharfen Operatoren (sowie weitere Systemparameter) wurden mittels eines speziellen Algorithmus so abgestimmt, daß

- die Anzahl *korrekter* Peaks möglichst hoch und
- die Anzahl *falsch* bestimmter Peaks sowie
- die Anzahl *unterbestimmter* Peaks möglichst niedrig ist.

Folgende Leistungen des Systems bei der automatischen Peak-Bestimmung wurden dabei erzielt:

korrekt	nicht	über	unter	falsch	korrekt	falsch
0.72	0.08	0.14	0.03	0.03	0.96	0.04

Die ersten fünf Zahlen geben die erreichten Quoten in den fünf Bestimmungs-Kategorien an ($\Sigma=1$). Die beiden letzten Quoten beziehen sich nur auf diejenigen Peaks, die sowohl vorgegeben als auch automatisch bestimmt wurden. Diese konnten nur entweder korrekt oder falsch bestimmt werden.

Bei weitem die meisten Peaks wurden korrekt erkannt. Die Anteile der falsch erkannten und der unterbestimmten Peaks sind mit ca. 3 % die geringsten von allen. Ebenfalls recht wenige Peaks werden korrekt nicht erkannt. Deutlich mehr Peaks (ca. 14 %) werden zugewiesen, obwohl sie nicht vorgegeben waren.

Die beiden letzten Spalten zeigen die hohe Leistung des Systems, wenn die Bewertung auf nachprüfbar Peaks beschränkt wird. Fast alle Peaks, die vorgegeben *und* bestimmt waren, wurden korrekt erkannt.

Subjektive Beurteilung der Leistungsfähigkeit

Im wesentlichen erhalten deutlich ausgeprägte Peaks eine Bewertung von θ_p nahe 1, während undeutlichere Peaks mit kleineren θ_p belegt werden. Auch die Bewertungen der Gesamt-Zuordnung θ haben eine anschaulich gut interpretierbare Aussagekraft: Für den Experten eindeutige Potentiale erhalten größtenteils eine erheblich bessere Bewertung als schwach ausgeprägte oder mehrdeutige Potentiale.

In den Abbildungen 6 bis 9 werden einige Beispiele automatischer Zuordnungen gezeigt. Über den automatischen sind jeweils die vorgegebenen Zuordnungen dargestellt. Die Zahlen ganz rechts geben die Latenzen in Millisekunden an. Links daneben erscheinen gegebenenfalls die Peak-Bewertungen θ_p , sowie ganz unten in dieser Spalte jeweils die Gesamt-Bewertung θ .

Abbildung 6 zeigt ein Potential, bei dem trotz fehlender deutlicher Trennung von Peaks IV und V beide korrekt erkannt wur-

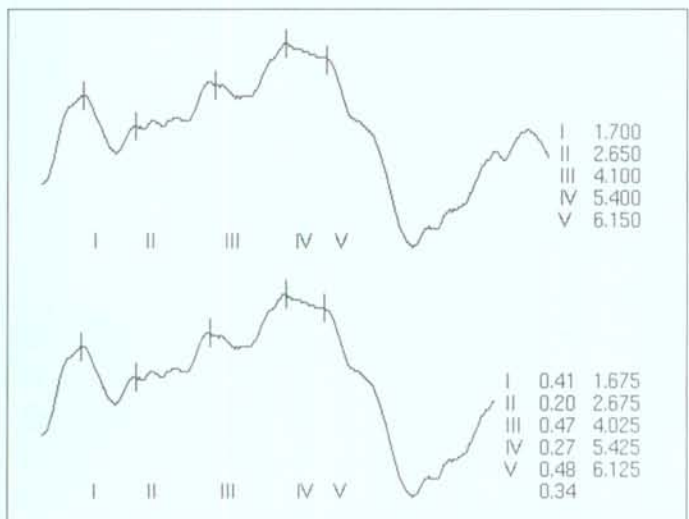


Abb. 6: Akzeptable Bewertung eines IV-V-Komplex (Reizpegel 95 dB NHL)

Fig. 6: Correct assignment and acceptable assessment of a IV-V complex (stimulus intensity 95 dB NHL).

den. Der mehrdeutige und schwach ausgeprägte Peak II ist entsprechend niedrig bewertet worden. $\theta = 0.34$ deutet eine recht zuverlässige Gesamtbewertung an.

Bei der Kurve in Abbildung 7 fehlt der Peak I (das erkennbare Maximum liegt zu weit vorn). Hier hat der Algorithmus einen falschen, aber mit $\theta_p=0.12$ auch sehr niedrig bewerteten Vorschlag gemacht. Peak IV ist ein breites, schwach gerundetes Maximum, ist daher schwer exakt bestimmbar und niedrig bewertet worden. Die schlechte Gesamtbewertung resultiert aus den absolut sehr großen Latenzen.

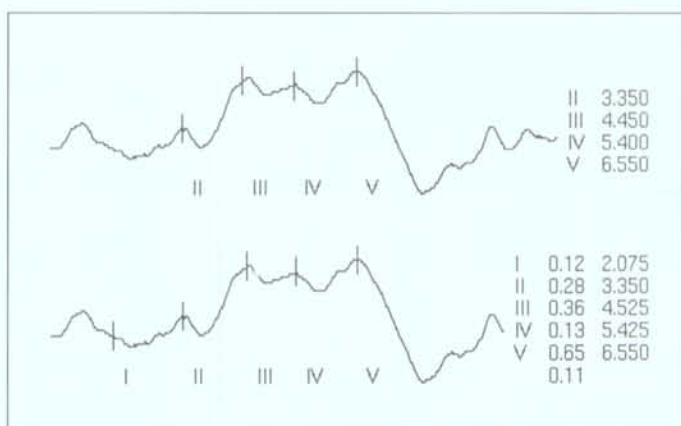


Abb. 7: Fehlender Peak I (Reizpegel 85 dB NHL)

Fig. 7: Missing peak I (the obvious maximum's latency is too short; stimulus intensity 85 dB NHL)

Bei schwach ausgeprägten Potentialen (z. B. wegen niedrigem Reizpegel; vgl. Abbildung 8) werden Grenzen des beschriebenen Verfahrens deutlich: Wegen des verhältnismäßig hohen Grundrauschens ist nur Peak V identifizierbar, nämlich anhand seines Steilabfalls und der contralateralen Übereinstimmung (in der Abbildung nicht dargestellt). Trotzdem erhält z. B. Peak I eine relativ hohe Bewertung. Die Gesamtbewertung von $\theta = 0.26$ erscheint ebenfalls unangemessen hoch.



Abb. 8: Problem – niedriger Reizpegel (30 dB NHL)

Fig. 8: Problem – low stimulus intensity (30 dB NHL). Too many peaks are assigned

Gut ausgeprägte Potentiale (Abbildung 9) werden mit entsprechend hohen Bewertungen belegt.



Abb. 9: Gut ausgeprägtes Potential (Reizpegel 95 dB NHL)

Fig. 9: Clearly shaped potential, appropriately high reliability values (stimulus intensity 95 dB NHL)

Gesamtbewertung

Abbildung 10 verdeutlicht die Qualität der Peak-Bestimmung anhand der Anteilsverläufe der fünf Bestimmungs-Kategorien über der Gesamtbewertung θ . Der Anteil der korrekt be-

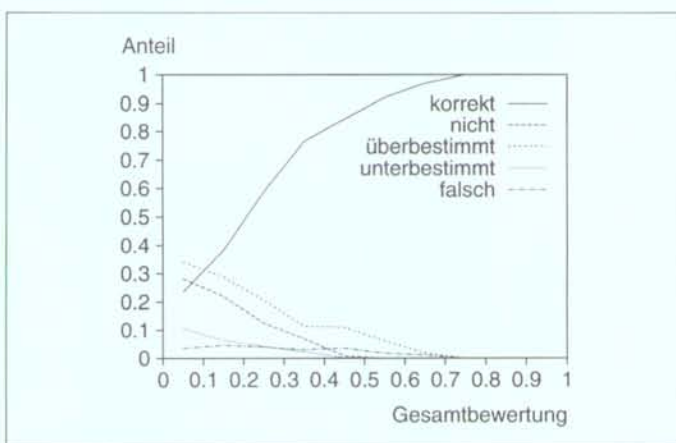


Abb. 10: Aussagekraft der Gesamtbewertung θ anhand der Bestimmungs-Kategorien

Fig. 10: Portions of the identification categories (correctly identified, correctly rejected, automatically but not visually identified, visually but not automatically identified, wrongly identified) as functions of the Total Assessment θ

stimmten Peaks nimmt monoton zu, während die Anteile aller anderen Kategorien abnehmen. Dies zeigt deutlich, daß hohe θ erwartungsgemäß vorrangig korrekt bestimmten Kurven zugewiesen werden.

Die Anteile der falschen und der unterbestimmten Peaks sind grundsätzlich klein. Schlecht erkennbare Peaks fallen also bei niedrigen θ meist in die Kategorien der überbestimmten und der korrekt fehlenden Peaks. Dies bestätigt, daß unsichere Potentiale in der Regel durch niedrige θ gekennzeichnet werden, auch wenn mehr Peaks bestimmt wurden, als es ein Experte tun würde (vgl. Abbildung 8).

Peak-Bewertung

Abbildung 11 zeigt die Sicherheit der automatischen Peak-Bestimmung anhand einer Aufstellung der Bestimmungs-Kategorien über der Peak-Bewertung θ_p . Die Anteilsverläufe der

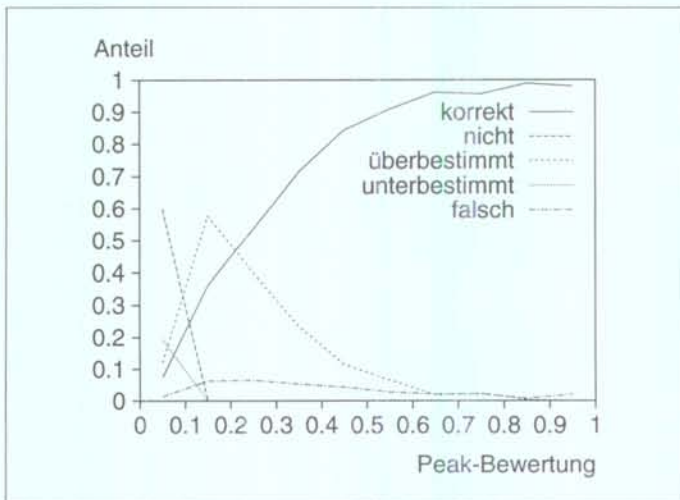


Abb. 11: Aussagekraft der Peak-Bewertung θ_p anhand der Bestimmungs-Kategorien als Mittelwert über alle Peaks I-V

Fig. 11: Portions of the identification categories (cf. Fig. 10) as functions of the Peak Assessment θ_p (mean values of peaks I-V).

einzelnen Kategorien ähneln denen in Abbildung 10. Auffällig ist der zunächst ansteigende Verlauf der überbestimmten Peaks. Er resultiert aus der Tatsache, daß in das erste Intervall die nicht zugeordneten Peaks mit einsortiert sind (vgl. die Anteile der korrekt fehlenden und unterbestimmten Peaks).

Auch hier ist der Anteil der falsch bestimmten Peaks grundsätzlich klein und nimmt mit zunehmendem θ_p weiter ab. Auch der Anteil der überbestimmten Peaks nimmt deutlich ab, was bei klar ausgeprägten Potentialen auch zu erwarten ist, da bei ihnen besonders häufig alle fünf Peaks vorgegeben sind. Die Kurvenverläufe zeigen deutlich, daß hoch bewertete Peaks als besonders verlässlich angesehen werden können. Bei $\theta_p \geq 0,8$ wird eine korrekte Bestimmungsrate von annähernd 100 % erreicht.

5. Diskussion

Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Leistungsfähigkeit unscharfer Operationen bei der Nachbildung menschlicher Entscheidungsprozesse. Bei mittelmäßig und gut ausgeprägten Potentialen wurde eine gute Übereinstimmung der automatisch bestimmten mit den vorgegebenen Peak-Latenzen erzielt, wobei Zuverlässigkeitswerte mit hoher intuitiver Aussagekraft vergeben wurden.

Schwächen offenbarte das System bei undeutlich ausgeprägten Potentialen. Oft wurden zu viele Peaks zugeordnet, die darüber hinaus zu hoch bewertet wurden. Andererseits wies die Gesamtbewertung θ in solchen Fällen stets auf die wenig aussagekräftige Zuordnung hin.

Für einen klinischen Einsatz muß dieser Effekt durch die Berücksichtigung weiterer Kriterien beseitigt werden, z.B. durch signaltheoretische Abschätzungen des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Die Parameter-Abstimmung in der Initialisierungsphase ermöglicht eine Anpassung an bestimmte Problemstellungen, z. B. typische pathologische Potentialverläufe. Andererseits birgt sie auch die Gefahr einer zu einseitigen Abstimmung, die der Vielfalt praktisch anfallender Daten nicht gerecht wird.

Literatur/References

Bachen, N. I. (1986, Juni). »Detection of Stimulus-Related (Evoked Response) Activity in the Electroencephalogram (EEG)«. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 33(6), 566-571.

Freeman, D. T. (1992). »Computer Recognition of Brainstem Auditory Evoked Potential Wave V By A Neural Network«. Ann Otol Rhinol Laryngol 101, 782-790.

Grönfors, T. (1993). »Peak Identification of Auditory Brainstem Responses with Multifilters and Attributed Automation«. Computer Methods and Programs in Biomedicine 40, 83-87.

Madhavan, G., de Bruin H., Upton A., Jernigan M. (1986). »Classification of Brainstem Auditory Evoked Potentials by Syntactic Methods«. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology 65, 289-296.

Pratt, H., Geva A., Mittelman N. (1993). »Computational Waveform Analysis and Classification of Auditory Brainstem Evoked Potentials«. Acta Otolaryngol (Stockh) 113, 279-284.

Sininger, Y. S. (1993). »Auditory Brainstem Response for Objective Measures of Hearing«. Ear and Hearing 14(1), 23-30.

von Specht, H., Kraak W. (1990). »Akustisch evozierte Potentiale«. In W. Kraak (Hrsg.) »Angewandte Akustik«, S. 76-101. Berlin: Verlag Technik.

Woodworth, W., Reisman S., Fontaine A. B. (1983, Juli). »The Detection of Auditory Evoked Responses Using a Matched Filter«. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 30 (7), 369-376.