

Helbig, Marko; Grießbach, Gert; Schack, Bärbel; Witte, Herbert:

Nutzung der Biphaseninformation in der zeitvarianten Bispektralanalyse

DOI: [10.22032/dbt.40210](https://doi.org/10.22032/dbt.40210)
URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019210240](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019210240)

Zuerst erschienen in: Biomedizinische Technik = Biomedical Engineering. - Berlin [u.a.] : de Gruyter. - 45 (2000), S2, S. 109-114.
Workshop Biosignalverarbeitung ; (München) : 2000.07.13-14

Erstveröffentlichung: 2000

ISSN (online): 1862-278X

ISSN (print): 0013-5585

DOI (Sammlung): [10.1515/bmte.2000.45.s2.11](https://doi.org/10.1515/bmte.2000.45.s2.11)

[Zuletzt gesehen: 2019-08-20]

„Im Rahmen der hochschulweiten Open-Access-Strategie für die Zweitveröffentlichung identifiziert durch die Universitätsbibliothek Ilmenau.“

“Within the academic Open Access Strategy identified for deposition by Ilmenau University Library.”

„Dieser Beitrag ist mit Zustimmung des Rechteinhabers aufgrund einer (DFG-geförderten) Allianz- bzw. Nationallizenz frei zugänglich.“

„This publication is with permission of the rights owner freely accessible due to an Alliance licence and a national licence (funded by the DFG, German Research Foundation) respectively.“



Nutzung der Biphaseninformation in der zeitvarianten Bispektralanalyse

M. Helbig¹, G. Griebach¹, B. Schack², H. Witte²

¹Institut f. Biomed. Technik u. Informatik, TU Ilmenau, Deutschland
²Institut f. Med. Statistik, Informatik u. Dokumentation, FSU Jena, Deutschland

Marko.Helbig@informatik.tu-ilmenau.de

EINLEITUNG

Mit Hilfe der Bispektralanalyse ist es möglich, quadratische Phasenkopplungen (QPC) zwischen Frequenzkomponenten zu analysieren. Die auf ein festes Zeitintervall bezogene Bispektralanalyse ist bisher weitreichend untersucht worden [1]. Sie setzt jedoch analog zur herkömmlichen Spektralanalyse Signalanforderungen (vor allem Stationarität) voraus, denen reale Biosignale zumeist nicht genügen. In diesem Sinne sind für das Bispektrum besonders transient auftretende quadratische Phasenkopplungen bedeutsam. Daraus folgt, daß zur Analyse dieser sich zeitlich ändernden Phänomene auch eine zeitvariante Bispektralanalyse mit einer ausreichend hohen Auflösung im Spektralbereich erforderlich ist. Eine neue Methode auf der Basis einer adaptiv rekursiven Schätzung der Kumulanten III. Ordnung wurde entwickelt und in [2] vorgestellt.

Eine sachgerechte Quantifizierung quadratischer Phasenkopplungen auf alleiniger Grundlage der Biamplitude ist aber kaum möglich. Das hängt u. a. vom Signal-Störabstand und der Anzahl vorhandener Einzelrealisierungen ab. Ein zu geringer Signal-Störabstand bei nur wenigen Realisierungen kann die Interpretationsfähigkeit der Biamplitude zerstören. Aus diesem Grunde wird das Bispektrum normiert. In der Regel wird die Biamplitude im Verhältnis zu den Leistungsspektren betrachtet (Bikohärenz). Hintergrund dieser Division ist die Eliminierung der Signalamplitudenabhängigkeit. Diese Quotientenbildung ist in der Praxis aber häufig mit numerischen Problemen behaftet.

In der vorliegenden Arbeit wird deshalb gezeigt, welchen Informationsgewinn die Analyse der amplitudenunabhängigen Biphasen speziell in der zeitvarianten Bispektralanalyse liefern kann. Konstruktionen adaptiv rekursiver Schätzungen von Biphasen Kenngrößen werden vorgestellt.

METHODEN

- *Klassische Ansätze zur Bispektrumschätzung*

Das Bispektrum $B(\omega_1, \omega_2)$ einer Zeitreihe $\{x_k\}_{k=0,1,\dots}$ kann auf verschiedenen Wegen berechnet werden. Dabei sind vorrangig die nicht-parametrischen Methoden (Periodogramm III. Ordnung (1) und die Fouriertransformation der Kumulanten III. Ordnung (2)) sowie die parametrischen Methoden (mittels AR- u. ARMA-Modellen) zu nennen [1].

$$B(\omega_1, \omega_2) = E\{X(\omega_1) \cdot X(\omega_2) \cdot X^*(\omega_1 + \omega_2)\} \quad (1)$$

$$B(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_3(\tau_1, \tau_2) \cdot e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (2)$$

Die Biamplitude hängt dabei in dritter Potenz von der Signalamplitude ab. Der Grad einer quadratischen Phasenkopplung wird aber an ihrer Stabilität gemessen – die Stärke der Phasenkopplung ist unabhängig von der Signalamplitude. Die Biamplitude ist folglich kein ausreichender Indikator für quadratische Phasenkopplungen. Das kann u. U. zu Fehlinterpretationen führen, wie im folgenden Beispiel gezeigt wird.

• *Simulationsbeispiel 1:* Ein Prozeß beinhaltet sechs Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen ($f_{A1}, f_{A2}, f_{A3}, f_{B1}, f_{B2}, f_{B3}$), wobei gilt:

- Kopplung A: die Komponenten f_{A1}, f_{A2}, f_{A3} sind frequenzgekoppelt (d.h.: $f_{A1} + f_{A2} = f_{A3}$), aber nicht phasengekoppelt (d.h.: $\varphi_{A1}, \varphi_{A2}, \varphi_{A3}$ sind voneinander unabhängig und gleichverteilt)

- Kopplung B: die Komponenten f_{B1}, f_{B2}, f_{B3} sind frequenzgekoppelt (d.h.: $f_{B1} + f_{B2} = f_{B3}$) und phasengekoppelt (d.h.: $\varphi_{B1} + \varphi_{B2} = \varphi_{B3}$)

Die Signalamplituden von A ($a_1, a_2, a_3 = a = 2$) seien größer als die von B ($b_1, b_2, b_3 = b = 1$).

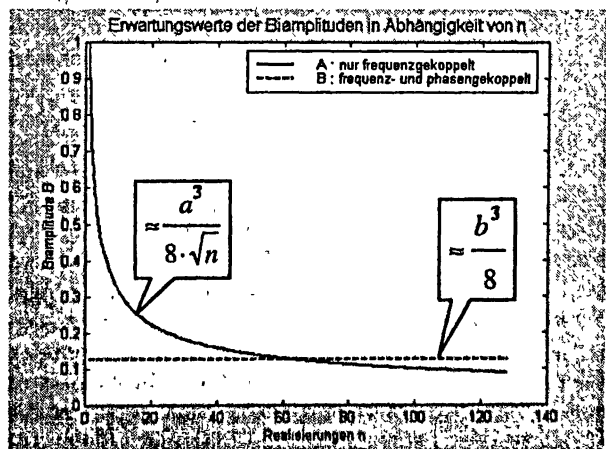


Abb. 1: Abhängigkeit der Biamplitude von der Realisierungsanzahl

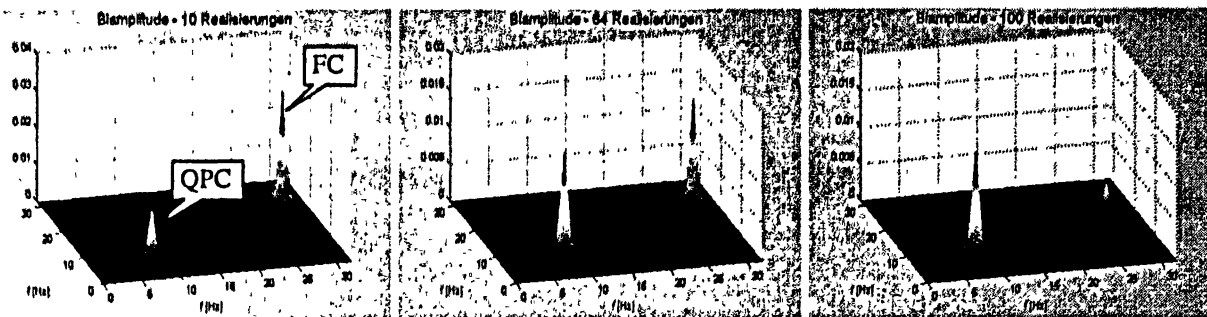


Abb. 2 : Bispektren von Simulationsbeispiel 1 bei steigender Realisierungsanzahl

In Abbildung 1 werden die Erwartungswerte der Biamplituden von A (durchgezogen) und von B (gestrichelt) in Abhängigkeit von der Realisierungsanzahl n dargestellt. Die Biamplitude der Frequenzkopplung A verringert sich mit der Wurzel der Realisierungsanzahl (beginnend bei $a^3/8$), die Biamplitude der quadratischen Phasenkopplung bleibt konstant bei $b^3/8$. Somit wird deutlich, daß in diesem Simulationsbeispiel schon bei doppelten Signalamplituden von A gegenüber B die Frequenzkopplung (FC) bei Realisierungen kleiner als 64 statistisch größere Biamplituden liefert als die völlig stabile quadratische Phasenkopplung. Der Einfluß der Signalamplitude kann u. U. so groß sein, daß sich dieser erst bei sehr vielen Realisierungen relativiert. Sind aber nicht so viele Realisierungen vorhanden (beispielsweise nur 10 bis 20 im obigen Beispiel), könnte dies bei alleiniger Betrachtung der Biamplitude zu Fehlinterpretationen führen. Abb. 2 zeigt exemplarisch Ergebnisse bei drei verschiedenen Realisierungszahlen.

Ein möglicher Ausweg bestünde darin, das Bispektrum mehrmals hintereinander mit wachsender Realisierungsanzahl zu berechnen und das Verhalten der Amplituden vorhandener Peaks zu beobachten.

Einen viel praktischeren Weg stellt eine Normierung dar, die diese Kopplungsstärke quantifiziert und den Einfluß der Signalamplitude eliminiert.

- Biphase / Phasenbikohärenz

Das Bispektrum ist eine komplexe Größe, dessen Betrag die Biamplitude und dessen Phasenwinkel die Biphase darstellen. Anhand (1) kann abgeleitet werden, daß sich die Biphase $\varphi_{Bi}(\omega_1, \omega_2)$ wie folgt aus den Signalphasen $\varphi(\omega)$ ergibt :

$$\varphi_{Bi}(\omega_1, \omega_2) = \varphi(\omega_1) + \varphi(\omega_2) - \varphi(\omega_1 + \omega_2) \quad (3)$$

Folglich ist klar, daß unter der Annahme einer festen Phasenkopplung $\varphi(\omega_1 + \omega_2)$ eine Funktion von $\varphi(\omega_1)$ und $\varphi(\omega_2)$ ist und die Biphase nahezu konstant bleibt. Existieren dagegen keine Interaktionen zwischen den Frequenzkomponenten, so sind die einzelnen Phasen völlig unabhängig voneinander und die Biphase wird zufällig verteilt sein. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage der von Saltzberg [3] und Shils [4] verwendeten Phasenbikohärenz (4).

$$\Gamma_{\varphi_{Bi}}(\omega_1, \omega_2) = \left| \left\langle e^{i\varphi_{Bi}(\omega_1, \omega_2)} \right\rangle \right| \quad (4)$$

Das zu analysierende Signal wird dabei in N Epochen unterteilt und $\langle \rangle$ symbolisiert die Mittelung über diese Epochen. Die Funktion dieser Kenngröße kann gut anhand zweier Biphasenpunkte im Phasenplot erläutert werden.

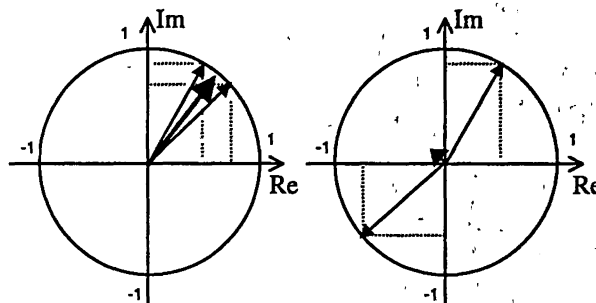


Abb. 3: Funktion der Phasenbikohärenz

Es werden dabei die Vektoren der einzelnen Biphasen auf dem Einheitskreis gemittelt und der Betrag des resultierenden Vektors berechnet. Dabei ist einzusehen, daß bei einer stabilen Biphase (Abb. 3 links) nahezu gleichverlaufende Vektoren gemittelt werden und somit der Betrag des sich ergebenden Vektors nahezu 1 bleibt. Andererseits heben sich die Wirkungen gleichverteilter Biphasen auf und es resultiert ein Vektor mit einem Betrag nahe 0 (Abb. 3 rechts).

- Biphasenvarianz

Einen anderen Zugang zur Interpretation der Phasenbikohärenz stellt die Varianz der Biphase dar. Im folgenden wird gezeigt, wie man mit Hilfe dieser Größe zu relevanten Parametern $P_{\sigma^2}^{\varphi_{Bi}}$ gelangt, um quadratische Phasenkopplungen zu quantifizieren. Dabei besteht zunächst die Möglichkeit die Varianz unmittelbar aus der Biphase $\sigma^2(\varphi_{Bi})$ zu berechnen. Doch das kann zu Problemen führen, so bald sich der theoretische Wert der Biphase im Bereich nahe π bzw. nahe $-\pi$ bewegt. Es ist leicht nachvollziehbar, wie in diesen Fällen geringe Änderungen der Lage im

Phasenplot große Änderungen der Biphasenvarianz hervorrufen (Abb. 4).

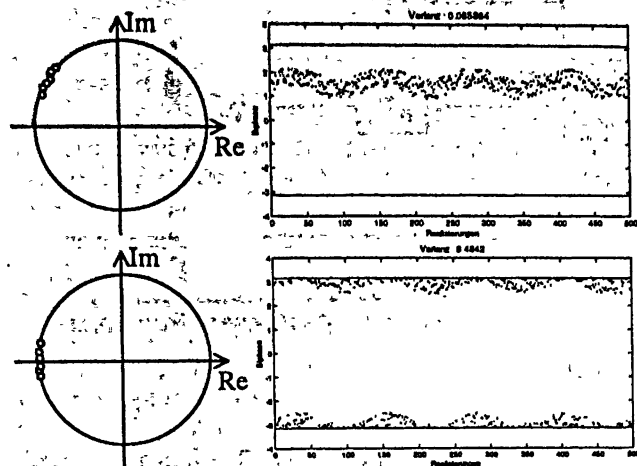


Abb. 4: Vergleich der Biphasenvarianz bei identischen Schwankungen um zwei verschiedene Punkte im Phasenbild

Eine deutliche Abschwächung dieses Effektes wird erzielt, indem man den Betrag der Biphasen betrachtet. Allerdings besitzt auch diese Vorgehensweise den Nachteil, daß im Falle von Signalen ähnlich Abb. 4 (unten) die Varianz unzulässig verfälscht wird.

Ein besserer Weg besteht darin, Real- und Imaginärteil getrennt zu behandeln und somit die Varianz des Cosinus und des Sinus der Biphasen zu betrachten, denn durch die Anwendung dieser Funktionen wird der Umbruch zwischen π und $-\pi$ in einen stetigen Übergang umgewandelt.

$$\begin{aligned} \sigma_{\cos}^2(\omega_1, \omega_2) &= \sigma^2(\cos(\varphi_{Bi}(\omega_1, \omega_2))) \\ \sigma_{\sin}^2(\omega_1, \omega_2) &= \sigma^2(\sin(\varphi_{Bi}(\omega_1, \omega_2))) \end{aligned} \quad (5)$$

Auch die alleinige Anwendung nur einer dieser trigonometrischen Funktionen reicht nicht aus, um die Varianz der Biphasenverteilung in allen möglichen Konstellationen zu quantifizieren. Mit Hilfe beider Funktionen können die Projektionen der Biphasenpunkte auf beiden Achsen erfaßt werden, so daß die folgende Kenngröße das Maß der Kopplungsintensität schon sehr gut quantifiziert.

$$P_{\sigma^2}^{\varphi_{Bi}}(\omega_1, \omega_2) = \sigma_{\cos}^2(\omega_1, \omega_2) + \sigma_{\sin}^2(\omega_1, \omega_2) \quad (6)$$

Eine Normierung nach Gleichung (6) ergibt nur Werte zwischen 0 und 1. Allerdings müssen diese in ihrer Bedeutung noch umgekehrt werden, denn gemäß der Definition der Phasenbikohärenz (4) spiegeln Werte nahe 1 eine feste Phasenbeziehung wider und nicht Werte nahe 0. Dies kann realisiert werden, indem die Werte von (6) von 1 subtrahiert werden (7).

$$P_{\sigma^2}^{\varphi_{Bi}}(\omega_1, \omega_2) = 1 - (\sigma_{\cos}^2(\omega_1, \omega_2) + \sigma_{\sin}^2(\omega_1, \omega_2)) \quad (7)$$

Durch Radizieren von (7) erhält man einen Ausdruck, der identisch mit der Phasenbikohärenz nach (4) ist.

$$\Gamma_{\varphi_{Bi}}(\omega_1, \omega_2) = \sqrt{1 - (\sigma_{\cos}^2(\omega_1, \omega_2) + \sigma_{\sin}^2(\omega_1, \omega_2))} \quad (8)$$

Mit Hilfe der bekannten Beziehungen

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$$

und

$$\sigma^2(x) = \overline{x^2} - \bar{x}^2$$

kann das gezeigt werden.

Doch mit der Biphasenvarianz läßt sich die Phasenbikohärenz nicht nur interpretieren. Mit Hilfe dieses Ansatzes bieten sich besonders bei der zeitvarianten Realisierung Möglichkeiten, weitere Kenngrößen zu konstruieren. Im folgenden Abschnitt wird darauf näher eingegangen.

- Dynamischer Ansatz

Adaptiv rekursive Schätzverfahren haben sich in verschiedenen Problemstellungen der Biosignalverarbeitung bewährt [5, 6, 8]. Auf der Grundlage dieser Methodik wurde auch die zeitvariante Berechnung des Bisppektrums realisiert. Als Ausgangspunkt diente der erfolgreiche Einsatz der adaptiv rekursiven Schätzung der Korrelationsfunktion (9).

$$K^c(X, Y) = [M^c(X \otimes L_0(Y)), \dots, M^c(X \otimes L_N(Y))] \quad (9)$$

Das Grundelement stellt dabei der adaptiv rekursive Mittelwertschätzer M^c dar. L_k symbolisiert den Lagoperator und c die Adaptionsvariable (10).

$$M^c: \begin{aligned} M_0 &= m_0 \\ M_{k+1} &= M_k + c \cdot (x_{k+1} - M_k) \end{aligned}$$

$$L_k: L_k(\{x_j\}_{j=0,1,\dots}) = \{x_{j+k}\}_{j=0,1,\dots} \quad (10)$$

Die Kovarianz ist gleich der Kumulante II. Ordnung. Die indirekte Schätzung des Bisppektrums beruht gemäß (2) auf der Fouriertransformation der Kumulanten III. Ordnung. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, auch die Kumulanten III. Ordnung und somit das Bisppektrum zeitvariant zu schätzen (11).

Aufgrund des oben dargestellten Einflusses der Signalamplitude auf die Biamplitude ist auch die zeitvariante Schätzung der vorgestellten Normierungsformen notwendig. Das bedeutet eine zweite, sich an die adaptive Kumulantenschätzung anschließende adaptive Schätzung der entsprechenden Biphasenparameter.

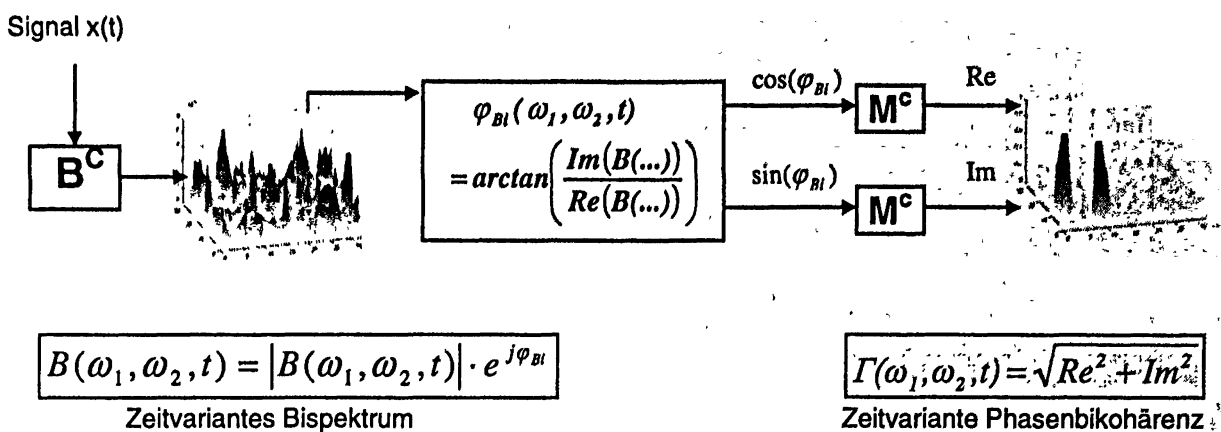


Abb.5 : Blockschaltbild der adaptiv rekursiven Phasenbikohärenzschätzung

$$CUM^c(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} M^c(X \otimes L_0(Y) \otimes L_0(Z)), & \dots, & M^c(X \otimes L_0(Y) \otimes L_N(Z)) \\ M^c(X \otimes L_1(Y) \otimes L_0(Z)), & \dots, & M^c(X \otimes L_1(Y) \otimes L_N(Z)) \\ \dots & & \dots \\ M^c(X \otimes L_{N-1}(Y) \otimes L_0(Z)), & \dots, & M^c(X \otimes L_{N-1}(Y) \otimes L_N(Z)) \\ M^c(X \otimes L_N(Y) \otimes L_0(Z)), & \dots, & M^c(X \otimes L_N(Y) \otimes L_N(Z)) \end{bmatrix} \quad (11)$$

In Abb. 5 ist das Blockschaltbild der adaptiv rekursiven Schätzung der Phasenbikohärenz dargestellt. Ausgangspunkt ist das zeitvariante Bispektrum, so daß zu jedem Zeitpunkt eine Matrix mit der aktuellen Schätzung zur Verfügung steht. Aus den komplexen Werten dieser Matrizen werden die Biphasen extrahiert und in ihren Cosinus- und Sinusanteil aufgesplittet. Von beiden Anteilen eines jeden Frequenzpunktes werden die adaptiv rekursiven Mittelwerte berechnet, so daß zu jedem Zeitpunkt auch eine Schätzung des mittleren Biphasenzeigers (siehe Abb. 3) vorliegt. Dessen Betrag entspricht der zeitvarianten Schätzung der Phasenbikohärenz.

Wie oben beschrieben läßt sich die Phasenbikohärenz auch über die Biphasenvarianz berechnen. Die adaptive Schätzung der Varianz S^c erfolgt nach :

$$s_{n+1} = s_n - c(s_n - (x_{n+1} - m_{n+1})^2) \quad (12)$$

bzw.

$$S^c(X) = M^c(X^2) - (M^c(X))^2$$

Das zugehörige Blockschaltbild zeigt Abb. 6. Doch dieser Ansatz bietet auch Möglichkeiten zur Konstruktion weiterer Kenngrößen. In [8] werden eine Reihe adaptiv rekursiver Kenngrößen am Beispiel der EEG-Vorverarbeitung dargestellt. Für den Einsatz in den Problemstellungen der vorliegenden Arbeit eignen sich anstelle der Varianz besonders die adaptiv rekursiven Formen der Rauigkeit (13) und des Dynamikmaßes (14).

$$dt_{n+1} = dt_n - c(dt_n - (x_{n+1} - x_n)^2) \quad (13)$$

$$dm_{n+1} = dm_n - c(dm_n - |x_{n+1} - x_n|) \quad (14)$$

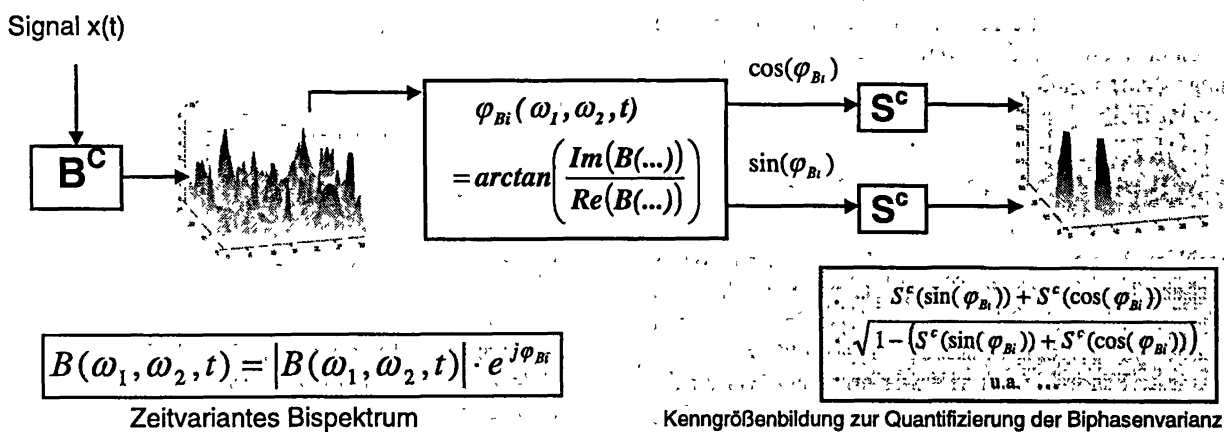


Abb.6 : Blockschaltbild der adaptiv rekursiven Schätzung weiterer Biphasenparameter

In diese Streukenngrößen gehen die Differenzen aufeinanderfolgender Signalwerte ein. Dies kann bei der Bewertung des Biphasenzeitverlaufs von Vorteil sein.

Die Funktionsweise der entwickelten Algorithmen wird im folgenden anhand eines Simulationsbeispiels demonstriert.

• **Simulationsbeispiel 2** : Es wird ein abrupter Wechsel zwischen zwei quadratischen Phasenkopplungen (QPC₁: 3/7/10 Hz, QPC₂: 13/17/30 Hz) von je 2s Dauer untersucht. Ohne zusätzliche Störeinflüsse ist dieser Übergang auch in der Biamplitude gut erkennbar. Um die Vorteile der Biphasen gegenüber der Biamplitude zu demonstrieren, wird zusätzlich noch eine Störfrequenz (25 Hz) hoher Amplitude überlagert.

In Abbildung 7 ist zu sehen, daß die quadratischen Phasenkopplungen aufgrund der hohen Störampplitude in beiden Signalhälften mittels Biamplitude nicht detektierbar sind.

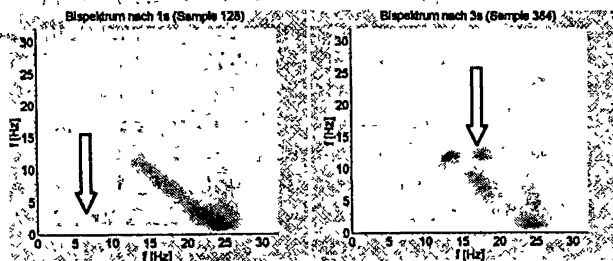


Abb. 7 : Biamplituden-Ergebnisse

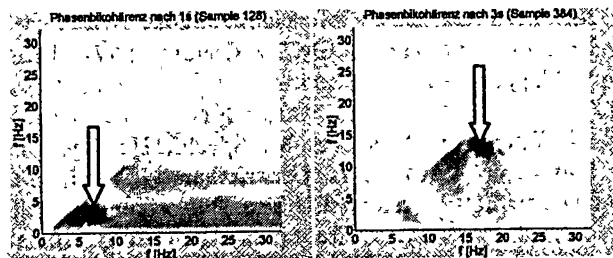


Abb. 8 : Phasenbikohärenz-Ergebnisse

Die in den Abbildungen 9 und 10 oben dargestellten Zeitverläufe der jeweiligen Biphasen und die unten dargestellten Zeitverläufe der Phasenbikohärenz spiegeln aber eindrucksvoll den simulierten Wechsel wider. Deshalb sind auch in den Matrizen der Phasenbikohärenz zu beiden Zeitpunkten die Peaks der simulierten Phasenkopplungen gut detektierbar (Abb. 8).

- Applikationsbeispiel

Das Auftreten von Burst-Suppression im EEG ist seit längerem bekannt. Dieses Phänomen tritt beispielsweise nach Hirnschädigungen oder während der Gabe von Narkosemitteln auf. Doch die Generationsmechanismen dieser Muster sind nicht ausreichend geklärt. Ihre Signaleigenschaften deuten darauf hin, durch ein nichtlineares System generiert worden zu sein. Folglich bietet sich die Bispektralanalyse zur Untersuchung an.

Burst-Suppression ist gekennzeichnet durch Zeitabschnitte, in denen die EEG-Aktivität unterdrückt ist

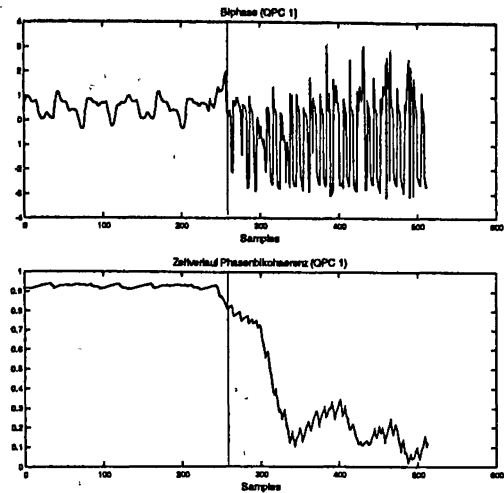


Abb. 9 : Zeitverläufe der Biphasen (oben) und der Phasenbikohärenz (unten) im Frequenzpunkt der ersten Phasenkopplung

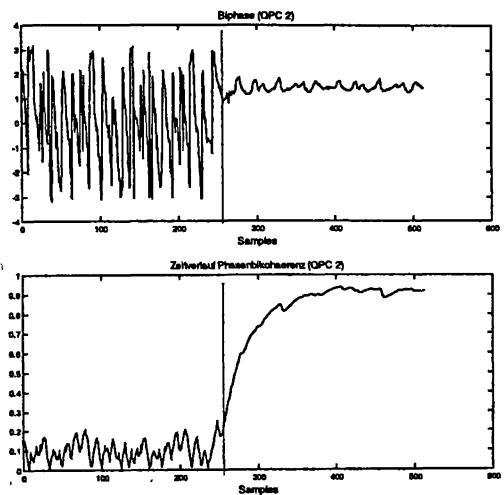


Abb. 10 : Zeitverläufe der Biphasen (oben) und der Phasenbikohärenz (unten) im Frequenzpunkt der zweiten Phasenkopplung

(Suppression), unterbrochen von einem plötzlichen, nur kurzzeitigen Aktivitätsanstieg (Burst). Die aus dem vermuteten nichtlinearen Generationsprinzip resultierenden quadratischen Phasenkopplungen während des Burstauftritts sind transientser Natur. Das heißt, das EEG während Burst-Suppression ist nicht stationär. Daraus folgt, daß klassische, intervall-bezogene Methoden nur bedingt oder gar nicht anwendbar sind. Daher ist es das Ziel, mit Hilfe der neu entwickelten zeitvarianten Methoden der Bispektralanalyse zu einer sachgerechten Analyse zu gelangen.

Es wird das EEG von 12 sedierten Intensivtherapie-Patienten mit Schädelhirntrauma untersucht. In einer vorangegangenen Studie von Witte u.a. [7] wurden diese Daten bereits mit Hilfe kontinuierlicher Kohärenzanalyse und intervallbezogener Bispektralanalyse untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie deuten daraufhin, daß zwei Kopplungsbereiche (0,5-2,5 Hz ↔ 3-7,5 Hz und 0,5-2,5 Hz ↔ 8-12 Hz) existieren.

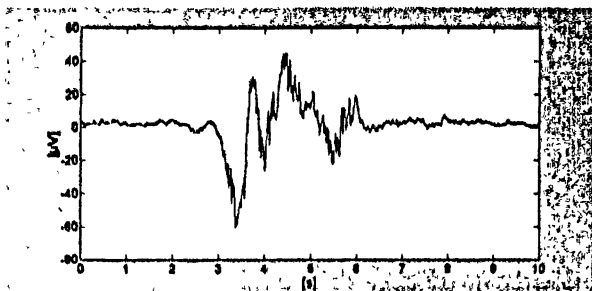


Abb. 11: Beispiel eines EEG-Burst-Signals

Mit Methoden der dynamischen Bisppektralanalyse auf der Basis einer adaptiv rekursiven Kumulantenschätzung konnten die Ergebnisse aus [7] bestätigt und die Zeitverläufe der Biamplituden präzisiert werden [2]. Weiterhin konnten höhere Biamplituden in den Burst-Mustern während der Burst-Suppression-Periode im Vergleich zu den burst-ähnlichen Mustern während des Sedierungsbeginns nachgewiesen werden, die auf einen Zusammenhang zwischen quadratischer Phasenkopplung und Sedierungstiefe hindeuten. Eine Quantifizierung der Stärke dieser Kopplungen kann wie beschrieben aber nur amplitudenunabhängig erfolgen.

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Verfahren zur zeitvarianten Analyse der Biphasen werden deshalb benutzt, um die auf der Biamplitude basierenden Ergebnisse zu bewerten. Die Ergebnisse dieser noch laufenden Untersuchungen werden in einer folgenden Arbeit veröffentlicht.

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde die Konstruktion von Algorithmen zur Schätzung zeitvarianter Biphasenparameter, insbesondere der Phasenbikohärenz, vorgestellt. Parameter auf der Basis der Biphasen stellen eine leistungsfähige Alternative zu bekannten Formen der Bikohärenzschätzung (Division durch das Produkt der Leistungsspektren) dar, da sie nicht mit numerischen Problemen, die durch eine Quotientenbildung hervorgerufen werden können, behaftet sind.

Mit dieser Arbeit ist es zum einen gelungen, auch die Normierung der Biamplitude dynamisch zu realisieren. So ist es möglich, auch instationäre Signale hinsichtlich transienter quadratischer Phasenkopplungen sachgerecht zu analysieren. Zum anderen konnte gezeigt werden, wie effizient Verfahren der adaptiv rekursiven Schätzung auch in derart komplexen Algorithmen eingesetzt werden können. Durch die zugrundeliegenden einfachen Konstruktionsprinzipien ermöglichen sie einen Einsatz im Echtzeitbetrieb.

LITERATUR

- [1] C.L. Nikias, A.P. Petropulu, „Higher-order spectra analysis – a non-linear signal processing framework“, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993
- [2] Helbig, M., Griebbach, G., Schack, B., Witte, H.: Application of time-variant bispectrum in biosignal analysis, European Medical & Biological Engineering Conference EMBEC'99, Vienna, 1999, S. 392-393
- [3] Saltzberg, B., Burton, W.D., Burch, N.R., Fletcher, J., Michaels, R.: Electrophysiological measures of regional neural interactive coupling. Linear and non-linear dependence relationships among multiple channel electroencephalographic recordings. Int. J. Biomed. Comput., vol. 18 (1986), 77-87
- [4] Shils, J. L., Litt, M., Skolnick, B. E., Stecker, M. M.: Bispectral analysis of visual interactions in humans, ELSEVIER Electroencephalography and clinical Neurophysiology 98 (1996), 113-125
- [5] Griebbach, G., Witte, H.: Complex adaptive procedures for EEG monitoring. In: Witte, H., Zwiener, U., Schack, B. und Doering, A. (eds.). Quantitative and Topological EEG and MEG Analysis. Druckhaus Mayer, Erlangen, 1997
- [6] G. Griebbach, U. Griebbach : Adaptive Korrelationsverfahren in der Biosignalanalyse. In: Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie (Proc. GMDS Congr. 1997), Ulm, 1997, pp. 80-84
- [7] H. Witte, Ch. Schelenz, M. Specht, H. Jäger, P. Putsche, M. Arnold, L. Leistriz und K. Reinhart: Interrelations between EEG frequency components in sedated intensive care patients during burst-suppression period. Neuroscience Letters, 260 (1999), pp. 53-56
- [8] Hoyer, D.; Griebbach, G.; Witte, H.; Schack, B.: Adaptive Verfahren zur Vorverarbeitung evozierter Potentiale. Biomed. Technik, vol. 35 (1990), S. 263 - 270

Die Arbeit wurde durch die DFG gefördert (GR 1555/2-2 und WI 1166/2-2).