

SUEmpathy-CardioResp – Einführung in die Spektralanalyse

Im SUEmpathy-CardioResp wird für die Spektralanalyse der nichtlinearer TRS-Algorithmus eingesetzt. TRS bedeutet Trigonometrische Regressive Spektralanalyse. Für die Analyse von nichtlinearen Regulationsprozessen in biologischen Systemen, sollten auch nichtlineare Analysealgorithmen zum Einsatz kommen. Der TRS-Algorithmus wurde speziell für die Bioregulationsanalyse entwickelt und findet bei Berechnungen der spektralen Leistungsparameter in den SUEmpathy-Systemen Anwendung. Dieser Algorithmus wurde im Rahmen der EuroBaVar-Studie [3] evaluiert.

Bisher wurde mangels Alternativen oftmals die Fourieranalyse (FFT) zur Berechnung der HRV-Spektren verwendet, obwohl sie per Definition nur bei stationären ergodischen Prozessen eingesetzt werden darf. Dies trifft aber gerade für die Zeitreihe der RR-Intervalle des Herzens nicht zu [1]. Ein weiteres Problem bei der FFT besteht darin, dass nur bei relativ langen Datensegmenten mit der FFT eine hinreichende Genauigkeit erreicht werden kann. Das biologische Objekt Mensch bleibt aber nahezu nie über einen längeren Zeitraum im stationären Zustand, sondern reguliert sich ständig auf Umweltfaktoren ein.

Ein weiteres Problem bilden die stochastischen kardiovaskulären Datenreihen, die an den zufälligen Herzschlag gekoppelt sind. Somit können im Rhythmogramm die RR-Abstände nur nach jedem Herzschlag gemessen, gerechnet und aufgetragen werden. Das Auftreten der Herzschläge ist aber grundlegend zufällig. Das Rhythmogramm hat also zu zufälligen Zeitpunkten auf der x-Achse auch zufällige Funktionswerte auf der y-Achse. (vgl. Abb.1) Per Definition ist die Summe aller Funktionswerte gleich der Gesamtzeit der Ableitung. Um hier überhaupt die FFT anwenden zu können, muss das Signal äquidistant nachabgetastet werden, was den genannten Zusammenhang aus der Definition für das Tachogramm bereits verloren gehen lässt.

Die TRS-Analyse legt grundsätzlich die originale zufällige Biosignalzeitreihe zugrunde. Daraus werden über Optimalitätskriterien die tatsächlichen Schwingungen (Rhythmen), die in dieser Zeitreihe vorhanden sind, herausgefiltert. Es ergibt sich ein Spektrum mit vergleichsweise wenigen Spektrallinien, die sich genauso stochastisch, wie im Zeitbereich, auch im Frequenzbereich abbilden. Die TRS-Analyse beschreibt die Zeitreihe über ihren statistischen Zusammenhang.

Der nichtlineare Zusammenhang der RR-Intervalle könnte mit einer Sinus- oder Cosinus-Funktion beschrieben werden. Durch die um 90 Grad gedrehten RR-Intervalle wird eine sinusförmige Regressionsfunktion gelegt.

$$Y_i = A \sin(\omega t_i + \varphi)$$

A ist die Schwingungsamplitude, ω ist die Schwingungsfrequenz und φ ist die Schwingungsphase. Die Berechnung ergibt eine trigonometrische Funktionsgleichung mit drei Unbekannten. Dieser Zusammenhang ist theoretisch mathematisch unlösbar.

Um praktisch eine Lösung zu erhalten, bedienen wir uns einer Approximationsstrategie wie sie bei Regressionen angewendet wird. Daraus wurde der Begriff der trigonometrischen Regression abgeleitet [2]. Die Berechnung soll so erfolgen, dass die Fehlervarianz ein Minimum sei. Dabei bleibt die Physiologie nicht unberücksichtigt, sie bestimmt maßgeblich die Approximationsstrategien.

$$\sum (RR_i - Y_i)^2 \rightarrow \text{Min.} \quad \sum (RR_i - A \sin(\omega t_i + \varphi))^2 \rightarrow \text{Min.}$$

Die RR_i sind die originalen RR-Intervalle. Die Methodik der TRS-Analyse ist eine rein statistische Beschreibung der Variabilität der RR-Intervalle.

Dies ergibt den unübertroffenen Vorteil einer hochgenauen dynamischen Verlaufsanalyse von Kurzzeitveränderungen. Durch eine zeitliche Verschiebung dieser kurzen lokalen Datensegmente kann die Variabilität der spektralen Parameter (Frequenzen, Amplituden, Frequenzbänder) erfasst werden. Im Gegensatz zu autoregressiven Methoden werden alle Oszillationen mit der gleichen (maximalen) Anzahl von RR Intervallen ermittelt. Die TRS Analyse erzeugt auf Grund der regressiven Technik physiologische Oszillationen. Diese Analyse kann auch unter Echtzeitbedingungen eingesetzt werden.

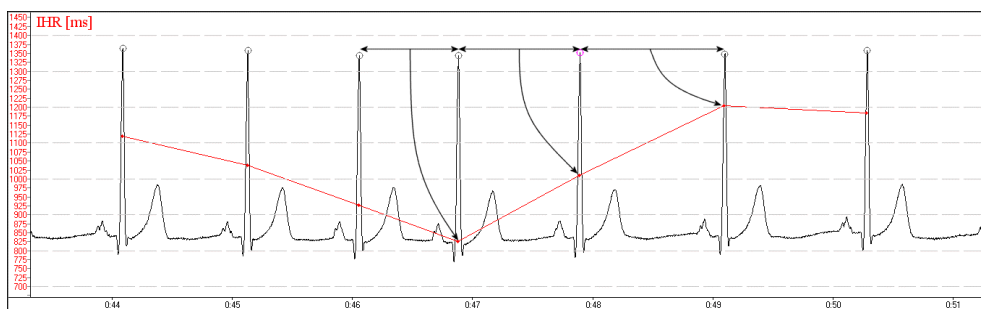


Abb.: 1 Berechnung des Rhythmogramms aus dem EKG (Zeitreihe der RR-Intervalle)

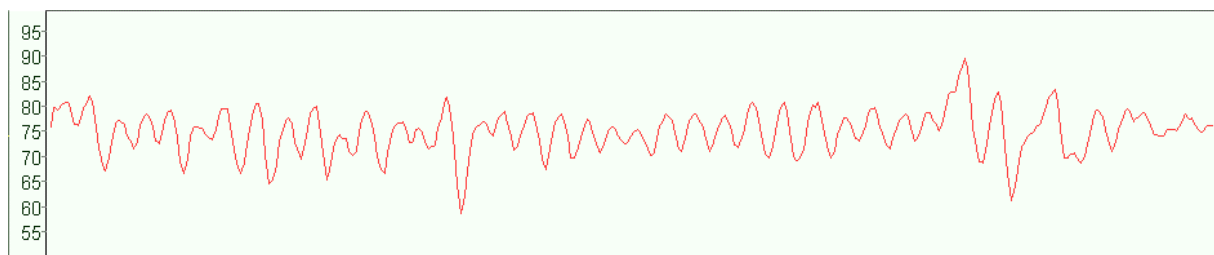
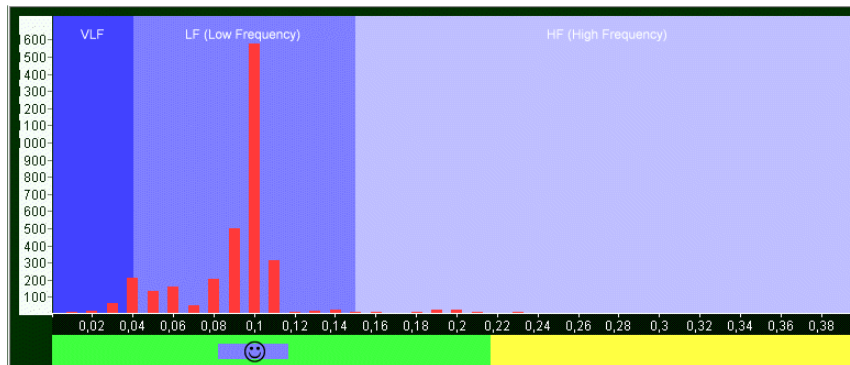


Abb.: 2 Rhythmogrammdarstellung

Um festzustellen, welche Frequenzanteile (Rhythmen) sich in einem solchen Rhythmogramm befinden, ist es notwendig, dieses in den Spektralbereich zu wandeln.



Abb, 3 Darstellung einer spektralen Leistungsdichteverteilung im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 0,4 Hz

Die Total Power (TP) ist ein Maß für die Gesamtenergie des Spektrums. Das Spektrum umfasst den Frequenzbereich von 0,01 – 0,4 Hz. Damit können 0,6 bis 24 Schwingungen (HRV-Rhythmen) pro Minute abgebildet werden. Je stärker die Regulationsdynamik, um so höher ist die TP. Der Wert der TP korreliert mit der Fläche unter dem RR-Histogramm. Ein schmales Histogramm bedeutet eine niedrige TP.

Die Maßeinheit ms^2 / Hz hat folgende Bedeutung: Die Zeitreihe der RR-Abstände ist in ms aufgetragen. Im Rhythmogramm sind in der y-Achse die RR-Abstände in ms aufgetragen und in der x-Achse die Anzahl. Die y-Achse wird damit als Amplitude interpretiert. Bei der Transformation in ein Leistungsspektrum ergibt sich ms^2 bezogen auf die Frequenz in Hz, weil in das Leistungsspektrum die Amplitude im Quadrat eingeht.

Anmerkung:

Eine gut ausgeprägte Regulationsdynamik resultiert aus einem starken Tonus des ventralen Vaguskomplexes (VVC), der sich in direkter Form als respiratorische Sinusarrhythmie zeigt. Der Verlauf im Rhythmogramm ist quasi-stationär (gleichmäßiger harmonischer Verlauf).

Herz-Rhythmusstörungen oder Arrhythmien verursachen eine hohe Pseudo-Regulationsdynamik und ggf. auch eine sehr hohe Totalpower. Der Verlauf im Rhythmogramm ist mehr spontan und ungleichmäßig. Hieraus können falsch positive Befunde resultieren, weil es sich hierbei durchaus um Aktivitäten des dorsalen Vaguskomplexes (DVC) handeln kann. Diese Aktivität kann Ausdruck eine postsympathischen Erschöpfungszustandes (siehe Stress-Adaptations-Syndrom) sein, wie man sie bei Stressfolgeerkrankungen finden kann. Eine überdurchschnittlich hohe TP muss nichts positives bedeuten!

Das HF-Band (0,15-0,40 Hz) korreliert mit dem kardialen ventralen Vagotonus. Es werden 9 bis 24 Schwingungen pro Minute abgebildet. Dies entspricht einer

Atemfrequenz von 9 bis 24 Zyklen. Das Maximum findet sich im Bereich der mittleren Atemfrequenz.

Das LF-Band (0,04-0,15 Hz) ist ein Mischband und unterliegt sympathischen und parasympathischen Einfluss. Der sympathische Anteil wird durch Blutdruckfluktuationen vermittelt (Mayer-Wellen). Über eine langsame Atmung unterliegt das LF-Band auch einem parasympathischen Einfluss.

Das VLF-Band (0,01-0,04 Hz) reflektiert den endokrinen, hormonellen und thermoregulatorischen Einfluss auf die Herzfrequenzmodulation (Katecholamine sowie das Renin-Angiotensin-System RAAS). Der Einfluss auf das VLF-Band wird derzeit international noch unterschiedlich diskutiert.

Der Anteil Atmung beschreibt die respiratorische Sinusarrhythmie RSA. Das sind die spontanen Fluktuationen der RR-Intervalle durch die Atmung. Während des Einatmens beschleunigt sich die Herzfrequenz und während des Ausatmens verlangsamt sie sich.

Der Anteil Blutdruck wird über den Barorezeptorenreflex moduliert. Die Barorezeptoren oder auch als Pressorrezeptoren beschrieben, reagieren auf Druckänderungen. Bei den Blutdruckschwankungen bilden die Mayer-Wellen den entscheidenden Anteil. Diese schwingen relativ frequenzstabil im 10 Sekundenrhythmus. Bei einer Atemfrequenz von 10 Sekunden (6 Atemzyklen pro Minute) kommt es durch den kardiorespiratorischen Resonanzeffekt zur Herzkohärenz. Dies wird charakterisiert durch einen schmalen spektralen Peak bei 0,1 Hz im LF-Band.

Der Anteil Endokrinum wird gebildet durch langsame Fluktuationen im Spektrum der Herzfrequenz. Dieser Anteil wird beeinflusst auch durch die Thermoregulation sowie hormonelle und humorale Faktoren. Eine genaue Zuordnung ist derzeit wissenschaftlich noch nicht vollständig geklärt.

Der LF/HF-Index wird in der Literatur fälschlicherweise als Marker der sympathovagalen Balance beschrieben. Diese resultiert aus einer bisherigen Annahme, dass sich der Zustand der Homöostase in einem regulativen Gleichgewicht zwischen Sympathikus und Parasympathikus definiert. Heute versteht man unter Homöostase den Zustand eines starken Tonus des ventralen Vaguskomplexes. Das Sympathikus und Parasympathikus weitgehend als Antagonisten arbeiten, bleibt davon unberührt.

Es werden die Bandleistungen LF und HF ins Verhältnis gesetzt. Eine Veränderung der Atemfrequenz hat Einfluss auf diesen Parameter. Unter dem Test Regulationsbreite (metronomische Atmung) kann dieser Parameter nicht bewertet werden. Seine Bedeutung liegt bei allen Adaptationsuntersuchungen.

Der Parameter LF/(LF+HF) ist ein Index der Modulation des sympathischen/parasympathischen Anteils zur Summe der Bandleistungen

LF+HF. Dieser Parameter ist auch wesentlich für Adaptationsreaktionen. Er zeigt einen Anstieg des Sympathikotonus bei Lagewechsel oder mentalem Stress. Durch Vernachlässigung des VLF Anteils im Spektrum wird die betrachtete Total Variance nur durch die beiden Anteile LF und HF repräsentiert. Der VLF Anteil ist u.a. abhängig von vom verwendeten mathematischen Analysealgorithmus und kann die Gesamtleistung (Total Power) im Vergleich zu anderen HRV Analysesystemen verfälschen. Um dem zu entgehen, wird hier auf diesen normierten Parameter zurückgegriffen, der in vielen internationalen Arbeiten zur besseren Interpretation der LF/HF Ratio verwendet wird.

Anmerkung:

In vielen Literaturstellen wird heute noch unter sympathovagaler Balance das Gleichgewicht im Tonus von Sympathikus und Parasympathikus beschrieben und dies als Homöostase erklärt. Die Polyvagal-Theorie hat diese Betrachtungsweise widerlegt. Homöostase ist ein Zustand mit einem stark ausgeprägten Parasympathikus, der für Leben und Wachstum verantwortlich ist. Stress ist ein Zustand, der eine Störung der Homöostase bewirkt. Für diesen Zustand ist ein Rückgang des vagalen Tonus charakteristisch.

Je stärker ein Mensch reguliert, um so besser sind die spektralen Anteile in den Frequenzbändern ausgeprägt. Bei langsamer Atmung findet man das Maximum der Bandleistung im LF-Bereich oder im Grenzbereich LF-HF. Ein ausgeprägter Sympathikotonus, der mit einer stark eingeschränkten oder fehlenden Regulation einhergeht, zeigt sich in einer fehlenden oder schwach ausgeprägten spektralen Bandleistung.

- [1] Rüdiger, H., Henke, St., Paditz, E., Ziemssen, T., Süß, M., Süß, F.: Untersuchung zur Genauigkeit der Abtastung von EKG-Signalen für eine nachfolgende Spektralanalyse kontinuierlich gemessener RR-Intervalle im Schlaflabor. Somnologie 10: 2006: 53-60
- [2] Rüdiger, H., Klinghammer, L. Scheuch, K.: The trigonometric regressive spectral analysis – a method for mapping of beat-to-beat recorded cardiovascular parameters onto frequency domain in comparison with Fourier Transformation.
Computer methods and Programs in Biomedicine 58 (1999) 1 – 15
- [3] Laude, D. et.al.: Comparison of various techniques used to estimate spontaneous baroreflex sensitivity (the Euroba Var study): Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 286, 2004: R226 – R231