



# Nichtlineare Analyse de ein neues Werkzeug de

Ein neues Werkzeug zur Objektivierung von Befindlichkeit, Komfort und Diskomfort, Stressbelastung und Erholungsfähigkeit ist seit einigen Jahren am IBO in Pilotprojekten erprobt worden.

Der historisch geprägte Begriff „Baubiologie“ ist schon immer etwas irreführend gewesen. Zum einen geht es beim gesundheitsfördernden Bauen nicht nur um Biologie, sondern mindestens ebenso um Psychologie und Ästhetik. Zum anderen werden die größten Probleme eines Bauwerks schon in der frühesten Planungsphase „eingebaut“. Befindlichkeitsstörungen, Komfortprobleme von Gebäudebenutzern und mangelnde Ergonomie von gebauten Umgebungen sind die Themen, mit denen sich das IBO unter dem Titel „Baubiologie“ beschäftigt.

## Ein neues Werkzeug

Befindlichkeitsstörungen werden oft mit einem Schulterzucken abgetan oder mit Schlaf-, Schmerz- und Beruhigungsmitteln übertönt (statt behandelt), wenn Möglichkeiten der Objektivierung, sprich Messung solcher Zustände fehlen. Damit wird auch die „Therapie“ dieser Zustände erschwert, die oft nicht in medizinischen Maßnahmen, sondern in einer praktischen Änderung der Wohnsituation (im weitesten Sinne) bestehen kann.

Ein neues Werkzeug zur Objektivierung von Befindlichkeit, Komfort und Diskomfort, Stressbelastung und Erholungsfähigkeit ist die Nichtlineare Analyse der Herzratenvariabilität. Das Verfahren ist seit einigen Jahren am IBO in Pilotprojekten erprobt worden. Die Ergebnisse ermutigen uns zu einem breiteren Einsatz.

## Das EKG als Lebensäußerung

Ein physiologischer Indikator für Stressbelastung und Erholungsfähigkeit ist die Herzratenvariabilität, in der sich Aktivitätsmuster des autonomen Nervensystems abbilden. Die Herzrate ist die wichtigste Stellgröße eines komplexen Regelnetzwerkes, an dem unter anderem Herz, Kreislauf, Atmung,

Temperatur, Stoffwechsel und psychomentale Einflüsse (z.B. Stress) beteiligt sind. Das autonome Nervensystem steuert und moduliert durch sympathische und parasympathische Aktivität die Rhythmen der Herzrate und gibt ihr dadurch ihre typische zeitliche Struktur, die als Herzratenvariabilität messbar ist.

Die Analyse der Herzratenvariabilität ermöglicht, Aussagen über den Zustand des autonomen Nervensystems und die autonome Regulation des menschlichen Organismus – beispielsweise die Steuerung und Modulation der biologischen Rhythmen oder die Adaptation an äußere Anforderungen (z.B. Reaktion auf eine Stresssituation) – zu treffen. [1] [2] [3]

## Das EKG als analysierbares Signal

Die Zeit-Amplitudenkurve der Herzerregung, das EKG, zeigt einen komplizierten Verlauf, der sich aber regelmäßig periodisch wiederholt. Als Merkzeichen für das Ende einer Periode und den Beginn einer neuen eignet sich der „Peak“, das Amplitudenmaximum. Die Periodendauer und die Herzrate – das ist die Anzahl von Perioden („Herzschlägen“) pro Minute – stehen im Mittelpunkt der folgenden Überlegungen. Auch unter Bedingungen einer im Mittel konstanten Herzrate schwanken die Periodendauern in engen Grenzen, sie zeigen Variabilität. Wir wollen wissen, ob die Variabilität chaotisch, zufällig, ohne innere Ordnung ist, oder ob sich darin Muster auffinden lassen.

Dazu betrachten wir Reihen von aufeinanderfolgenden Periodendauern und fragen uns: Wo finden wir in unserer Zeitreihe weitere Abschnitte, wo die gleiche Reihenfolge von Periodendauern auftritt? Dafür müssen wir zunächst zwei Parameter festlegen.

## Eine geeignete $\epsilon$ -Umgebung

Erstens stellt sich die Frage: was ist unser Kriterium dafür, daß wir zwei Periodendauern „gleich“ nennen? Da wir das EKG nicht mit unendlicher Genauigkeit messen können, kann „gleich“ nur bedeuten: Zwei Periodendauern fallen in die gleiche Größenklasse, wobei die Klassenbreite von der Genauigkeit des Meßgerätes begrenzt wird. Das EKG-Gerät „Heartman“ tastet den Verlauf der Herzerregung mit einer Frequenz von 6000 Hz ab, eine Periode dauert meist zwischen 0,5 und 1,0 Sekunden (entsprechend Herzraten von 60 bis 120 /min). Wir könnten also die Periodendauer auf rund 0,167 Millisekunden genau messen und eine Periode von 1 s Dauer in 6000 Klassen einteilen. Aber ist die feinste Klasseneinteilung die beste? Unser Ziel ist, Muster von wiederkehrenden Reihenfolgen von Periodendauern in der Zeitreihe zu finden. Je feiner wir die Klasseneinteilung wählen, desto unwahrscheinlicher ist, dass wir gleiche Reihenfolgen finden. Je gröber die Klasseneinteilung, desto wahrscheinlicher. Hier müssen wir optimieren. Ein Vergleich mit einem Foto hilft weiter. Zu lange Belichtungszeiten würden ein zu dunkles Bild, zu kurze ein zu helles Bild erzeugen. Beim Fotografieren wählen wir eine „geeignete“ Belichtungszeit, um eine optimale Differenzierung heller und dunkler Stellen zu erreichen. Wir werden also durch Variieren der  $\epsilon$ -Umgebung eine „geeignete“ Klasseneinteilung ermitteln, die gut differenziert.

## Die Eliminierung „falscher Nachbarn“

Zweitens müssen wir klären: Aus wievielen Periodendauern sollen die Reihenfolgen, die wir betrachten, bestehen? Dies wird mit einem algorithmischen Verfahren („Eliminierung falscher nächster Nachbarn“) festgestellt, das hier allerdings nicht näher erklärt wird. Durch dieses Verfahren eva-

liefert, haben sich für 24h-EKG's 5 Perioden (ein Quintupel) als geeignet erwiesen. Nun sind wir bereit, mit der Suche nach gleichen Reihenfolgen zu beginnen. Wir teilen die Zeitreihe ein und nummerieren sie:

PeriodenNr.  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 ...

und bilden Quintupel nach folgender Regel:

- 1,2,3,4,5
- 2,3,4,5,6
- 3,4,5,6,7
- 4,5,6,7,8
- 5,6,7,8,9
- ...

### Recurrence-Plots

Die Ergebnisse unserer Suche tragen wir in einen Recurrence-Plot ein. Wie der Name sagt, zeigt ein Recurrence Plot auf, wann ein Ereignis in einer Zeitreihe wiederkehrt. Waagrecht und senkrecht sind die Zeit aufgetragen. Alle Ereignisse der Zeitreihe finden sich daher als Punkt auf der Diagonale. Ereignisse, die nur ein einziges Mal in der Zeitreihe auftreten, finden sich nur auf der Diagonale.

Alle Quintupel der Zeitreihe (in der Abb 1 werden der Einfachheit halber Tripel statt Quintupel betrachtet) werden also auf der Diagonale des Plots als Punkt eingetragen. Vorkommnisse eines gleichen Quintupels zu anderen Zeitpunkten werden – abseits der Diagonale – ebenfalls als Punkt eingetragen. Ergebnis ist eine Punktemenge, die wir auf ihre Struktur hin untersuchen können.

Nun betrachten wir einen Recurrence-Plot einer 24 h EKG-Messung. Es ist die Zeit von 12 Uhr mittags bis 12 Uhr mittags des nächsten Tages aufgetragen (Abb. 2)

Abb. 2: Recurrence-Plot einer 24 Stundenmessung: Entlang der Achsen ist die Herzrate als Zeitreihe von 12 Uhr mittags bis 12 Uhr mittags des nächsten Tages aufgetragen. Der Nachmittag (NM), die Nacht (N) und der darauffolgende Vormittag (VM) bilden sich als graue, spiegelsymmetrische blockartige Flächen entlang der Diagonale ab.

In diesem dargestellten Recurrence-Plot bilden sich die unterschiedlichen Abschnitte der 24-Stundenmessung – Nachmittag/Arbeitsbelastung – Nacht/Schlaf – Vormittag/Arbeitsbelastung – als blockartige struk-

turierte Flächen (NM – N – VM) entlang der Diagonale ab, der zeitliche Verlauf ist an den parallel zu den Achsen (waagrecht und senkrecht) aufgetragenen Herzraten-Zeitreihen abzulesen. Die Phasenübergänge zwi-

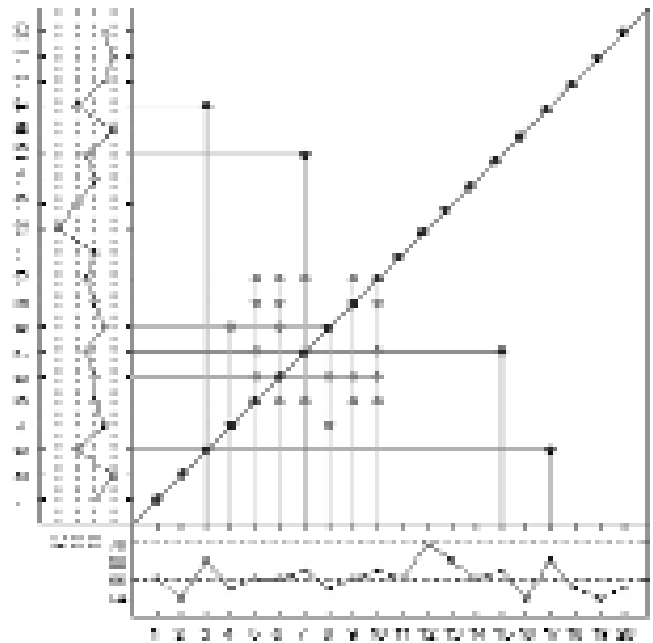
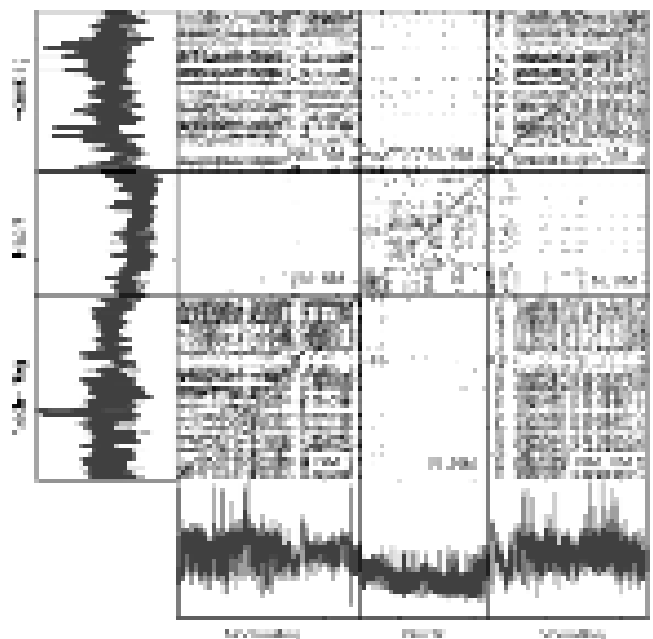


Abb. 1: Recurrence-Plot für Tripel (Reihenfolgen von drei Punkten) einer Reihe von 20 Ereignissen (z.B. Herzraten)



schen Wachzustand (Tag) und Schlafzustand (Nacht) sind in den scharfen Abgrenzungen der einzelnen Flächen deutlich erkennbar. Im Zeitabschnitt von 12 Uhr mittags bis zur Schlafengezeit der Versuchsperson (repräsentiert durch die Fläche NM um die Diagonale im Recurrence-Plot) und im Zeitabschnitt vom Aufstehen am nächsten Morgen bis 12 Uhr mittags (Fläche VM) finden sich viele ähnliche Strukturen in der Zeitreihe – dies zeigt sich in relativ dichten, kompakten Färbungen. Die Herzratenvariabilität folgt hier häufig bestimmten Mustern und diese Muster wiederholen sich innerhalb der Tages-Block-Strukturen (NM und VM). Dieses „Tages“-Muster ist im Idealfall während der Nacht nicht zu finden. Umgekehrt gibt es während der Nacht bestimmte Muster, die in der Nacht-Fläche (N) häufig auftreten, fast nie aber während des Tages. Daher bleiben die Bereiche im Recurrence-Plot, in

denen Tagesphasen gegen die Nachtphase aufgetragen sind – (N : NM), (N : VM) – weiß.

Dichte Linienstrukturen im Plot weisen auf deterministisches Verhalten hin: an diesen Stellen, in diesem Zeitraum, tritt eine Folge von sehr ähnlichen Herzraten auf. Das ist der Fall, wenn die Regulationsmöglichkeit des Herzens eingeschränkt ist, d.h. die Herzrate sehr gleichförmig ist und kaum Variabilität zeigt. Das ist tagsüber beispielsweise bei anstrengender körperlicher Arbeit oder bei hoher Stressbelastung der Fall. Nachts (Fläche N um die Diagonale) deuten dichte Linien/Bänder, die sich mit Linien/Bändern geringer Punktdichte abwechseln, auf strukturierten Schlaf – dem Wechselspiel zwischen Tiefschlaf und REM-Schlaf – hin. Unregelmäßig verteilte, weniger dicht liegende Punkte sind ein Hinweis auf stochastische Eigenschaften der Zeitreihe: hier treten selten ähnliche Herzratenverläufe auf, das vegetative System kann in der Ansteuerung des Herzens gut auf die sich ständig ändernden Bedingungen reagieren.

Aus diesen Betrachtungen sehen wir schon, daß es sinnvoll wäre, den optischen Ein-

druck des Recurrence-Plots durch Maßzahlen, durch statistische Kennzahlen der Punkte zu ergänzen. Das würde uns helfen, detailliertere Fragen zu beantworten.

#### Recurrence-Plots-Kennzahlen

Die optische Information des Recurrence-Plots lässt sich durch Kennzahlen, die bestimmte Eigenschaften der Dynamik des Systems repräsentieren, quantifizieren. Recurrence-Plots-Kennzahlen sind also jene Maßzahlen, welche die Punktmenge aus farbigen und weißen Punkten des Recurrence-Plots statistisch quantifizieren. [4] [5] [6] [7]

Zu den Recurrence-Plots-Kennzahlen zählen unter anderen % Recurrence, % Determinismus, Entropie, Divergenz und Ratio.

Die Kennzahl % Recurrence ist das Verhältnis der farbigen Punkte zu allen möglichen Punkten des Recurrence-Plots. Bei periodischen Systemen fällt dieser Wert höher aus als bei aperiodischen Systemen. Die Maßzahl %Determinismus ist das Verhältnis der farbigen Punkte, die kurze Diagonalen bilden, zur Gesamtzahl der farbigen Punkte im Plot. Determinismus liegt vor, wenn Verläufe



in der Zeitreihe sich über einen größeren Zeitabschnitt sehr ähnlich sind. Dieses Verhalten zeigt sich im Recurrence-Plot als kürzere oder längere Linien, die parallel zur Hauptdiagonale des Recurrence-Plots sind. Viele solcher Linien zeichnen eine deterministische Struktur der Zeitreihe aus. Die Entropie des Histogramms der Linienverteilung ist ein Maß für die Komplexität eines Recurrence Plots. Je komplexer die deterministische Struktur der Recurrence-Plots ist, umso größer ist die Entropie. Der Parameter ‚Divergenz‘ ist das Inverse der Länge der längsten Linie. Die längste Linie ist die Dauer jener beiden Verläufe, die sich über die längste Zeit hinweg ähnlich sind. Das Verhältnis von %Determinismus zu %Recurrence stellt die Kennzahl Ratio dar, mit dem man Änderungen im dynamischen Zustand der Zeitreihe aufspürt.

Zur Berechnung der Recurrence-Plots-Kennzahlen wird über die gesamte Zeitreihe eine sogenannte „gefensterte“ Recurrence-Plots-Analyse durchgeführt. Dabei wird die Zeitreihe in kleine, sich überlappende Teilabschnitte (=Fenster) zerlegt, die jeweils nur eine bestimmte Anzahl von Datenpunkten enthalten: für jeden dieser Abschnitte der Zeitreihe werden ein Recurrence-Plot erstellt und die zugehörigen Parameter berechnet.

Dadurch erhält man eine (Zeit)-Reihe von Recurrence-Plots-Kennzahlen, die jeweils einem bestimmten Abschnitt der Zeitreihe zugeordnet sind.

### Qualitative Auswertung durch Recurrence-Plots

Im Folgenden werden für eine Versuchsperson die Recurrence-Plots von drei verschiedenen 24-Stundenmessungen dargestellt. Anhand dieser Plots können bestimmte typische Verläufe, wie beispielsweise schlechte und wenig erholsame Nächte, besonders anstrengende Tage, Urlaubstage bzw. arbeitsfreie Tage im Vergleich zu „normalen“ Arbeitstagen ersehen werden. In der Abbildung ist unter jedem Recurrence-Plot die zugehörige Herzraten-Zeitreihe dargestellt, der von der Versuchsperson im Tätigkeitsprotokoll als „Schlaf“ ausgewiesene Zeitraum ist als grauer Balken unterhalb der Zeitreihe eingezeichnet.

### Recurrence-Plots einer 20-30 jährigen Versuchsperson

In der Abb. 3 (1) zeigt sich eine gute Nachtstruktur, die Tagesstruktur ist allerdings sehr kompakt, die hohe Punktdichte deutet auf starke (körperliche) Arbeitsbelastung hin.

Auch in (2) ist die Tagesbelastung am Nachmittag sehr groß: die Struktur der darauffolgende Phase, die sich bis zum Ende der 24-Stundenmessung erstreckt, ist ungewöhnlich: die Versuchsperson ist erkrankt und schläft auch am Vormittag. (3) ist der Recurrence-Plot einer 24-Stunden-Messung, die mit einem freien Nachmittag beginnt: das Bild der Blockstruktur, die diesen Nachmittag repräsentiert, unterscheidet sich deutlich von dem der Blockstruktur des darauffolgenden Arbeits-Vormittag: dieser weist eine weit höhere Punktdichte auf, die eine hohe Arbeits- und Stressbelastung belegen.

### Recurrence-Plots-Kennzahlen

In den folgenden Beispielen sind die Recurrence-Plots-Kennzahlen für zwei Versuchspersonen als Beispiele für gut und schlecht strukturierte Nächte dargestellt. Die von den

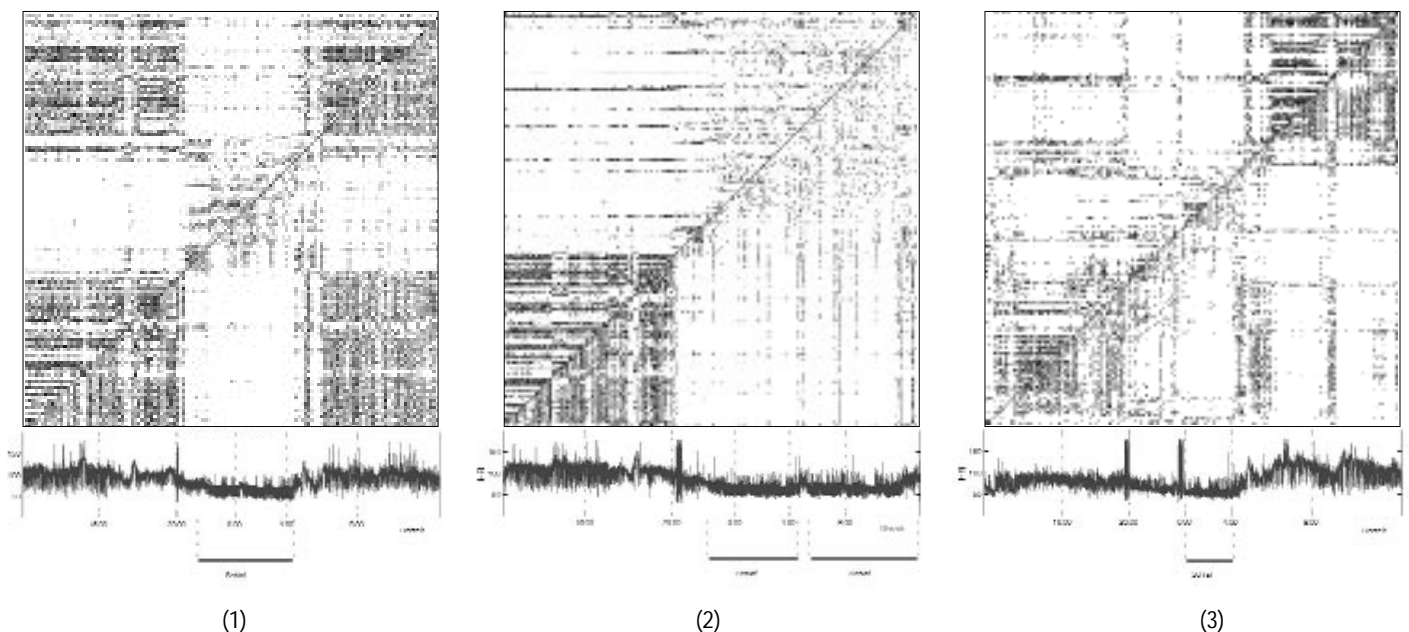


Abb. 3: Recurrence-Plots und Herzratenverlauf von 24 Stundenmessungen einer 20-30 jährigen Versuchsperson: (1) in einer normalen Arbeitswoche, (2) an einem Arbeitstag mit Schlaf (Erkrankung) am Vormittag, (3) an einem Arbeitstag mit freiem Nachmittag.

## Nichtlineare Analyse der Herzratenvariabilität

Fortsetzung von Seite 19

Versuchspersonen im Tätigkeitsprotokoll angegebenen Zeiträume von unterschiedlicher Arbeitstätigkeit, Schlaf und anderen Aktivitäten sind als farbige Balken unterhalb der Zeitreihe eingetragen.

Recurrence-Plots-Kennzahlen einer 45 - 55 jährigen Versuchsperson

Der Tagesdeterminismus während der Arbeit zwischen (I, III) und (IV und VI) ist altersbedingt mit Mittelwerten um 95% sehr hoch (Abb 4), fällt aber in (1) nachts (II) deutlich ab, dies weist auf eine gute Erholung während der Nacht hin. In (2) fällt der nächtliche % Determinismus (V) – im Mittel 89 % – kaum gegenüber dem Tag ab, die Nacht bringt nur unzureichende Erholung. Die schlechte Nacht (VIII) in (2) wird durch

fehlende Schlafstruktur bestätigt: in der Kennzahl Ratio finden sich keine ausgeprägten Peaks, die den charakteristischen Wechsel zwischen Tiefschlafphase und REM-Schlafphase anzeigen. In (1) sind diese Peaks während der Nacht (VII) deutlich ausgeprägt, der Schlaf ist gut strukturiert.

Recurrence-Plots-Kennzahlen einer 20 - 30 jährigen Versuchsperson

Die Kennzahl %Determinismus zeigt in (1) eine gute nächtliche Absenkung (I) auf einen Mittelwert von 73% und bleibt am darauffolgenden Vormittag (II) niedrig (im Mittel 83%): die gute Nachterholung wirkt bis in den Vormittag nach. In (2) zeigt der %Determinismus einen sehr untypischen Verlauf: er fällt zwischen 18:00 und 20:00 deutlich ab, steigt dann gleich wieder an und bleibt während der ganzen Nacht (III) sehr hoch (mittlerer %Determinismus: 94%). Am folgenden Arbeitsvormittag (VI) erreicht der Determinismus mit einem Mittelwert von 97% sein absolutes Maximum, die Belastung ist außerordentlich hoch. Während in (1) in der Kennzahl Ratio passa-

ble Schlafarchitektur (Wechsel zwischen den Schlafphasen) während der Nacht (V) angezeigt wird, findet sich in (2) nur am Abend (VI) strukturierter Schlaf, während in der Nacht (VII) keinerlei Schlafaktivität erkennbar ist.

Die Versuchsperson hat in (2) ein kurzes Nickerchen (VI) am Abend gehalten, die Nacht dann ohne Schlaf verbracht. Die daraus resultierende fehlende Nachterholung schlägt sich mit dem schon erwähnten, äußerst hohen %Determinismus am folgenden Tag nieder. Die Kennzahl Entropie fällt in (1) während der Nacht ab, in (2) steigt er kontinuierlich an, dieser Anstieg zeigt zunehmende Belastung an.

### Referenzen

Die Methode wurde verwendet im: Forschungsprojekt im Auftrag des Österreichischen Kachelofenverbandes: Die Auswirkungen von Kachelofen- bzw. Radiatorbeheizten Räumen auf physiologische Zustandsparameter beim Menschen; IBO 2000.

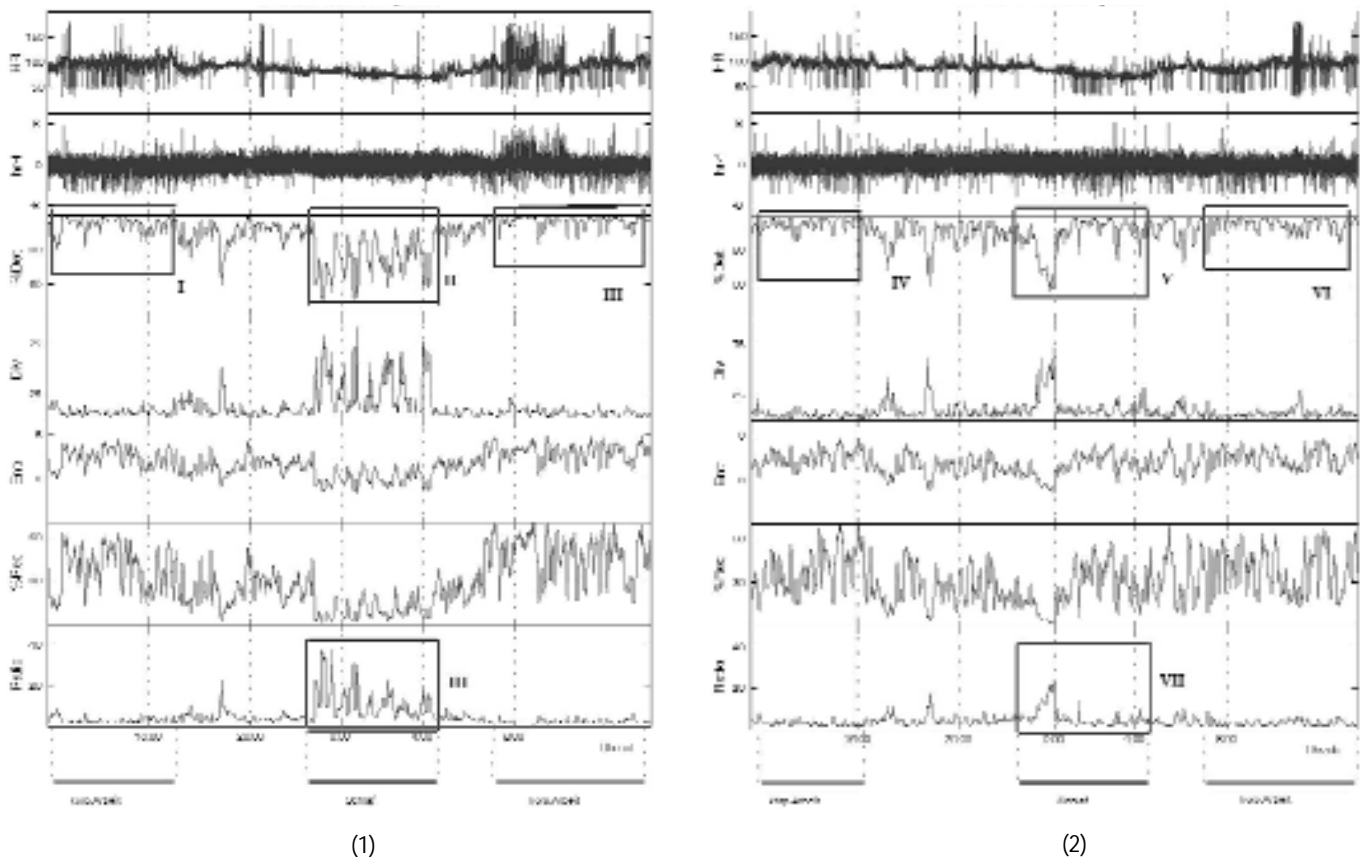


Abb. 4: Herzratenzeitreihe (HR), gefilterte Herzratenzeitreihe (hr-f) und Recurrence-Plots-Kennzahlen (%Determinismus, Divergenz, Entropie, %Recurrence, Ratio) von 24 Stundenmessungen einer 45 – 55 jährigen Versuchsperson: (1) mit guter (2) mit schlechter nächtlicher Schlafstruktur.

Zitierte Literatur

[1] Lipp B., Rohregger G., Moser M., Frühwirth M., Niederl T., Messerschmid M.: Auswirkung der Arbeitsbelastung von Fernfahrern auf ihre Schlafstruktur, Forschungsbericht IBO GmbH., Wien 1998

[2] Lipp B., Rohregger G., Moser M., Frühwirth M., Lackner H., Klima H.: Die Auswirkung von Kachelofen- bzw. Radiator-beheizten Räumen auf physiologische Zustandsparameter beim Menschen. Forschungsbericht IBO GmbH., Wien 2000

[3] Lipp B.: Nichtlineare Analyse von Zeitreihen mit Schnell-Langsam-Dynamik am Beispiel von EKG-Daten, Dissertation TU Wien, Wien 1997

[4] Nourbakhch R.: Recurrence Plot Analysis and its Application to Autonomous Neuropathies. Diplomarbeit TU Wien, Wien 1998

[5] Stögbauer H.: Nichtlineare Analyse von physiologischen Zeitreihen am Beispiel der Herzrate im Schlaf. Diplomarbeit TU Wien, Wien 2001

[6] Webber C. L., Zbilut J.: Dynamical Assessment of Physiological Systems and State using Recurrence Plot Strategies. J.Appl. Physiol. 76: 965-97 (1994):

[7] Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D.: Recurrence Plots of Dynamical Systems. Europhysics Lett. 4(9): 973-977. (1987)

Dr Tobias Waltjen  
DI Dr. Bernhard Lipp  
DI Dr. Gabriele Rohregger  
IBO GmbH

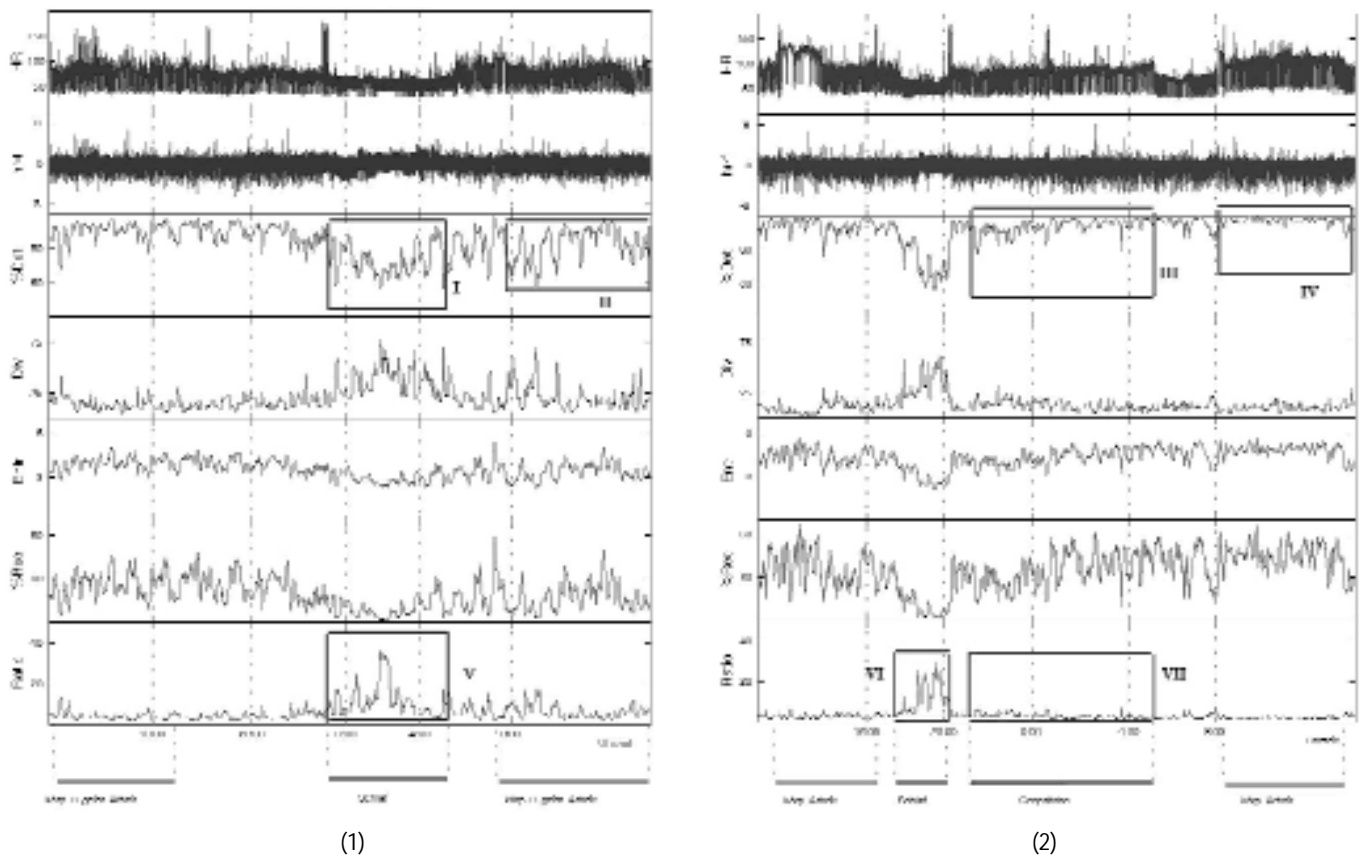


Abb. 5: Herzratenzeitreihe (HR), gefilterte Herzratenzeitreihe (hr-f) und Recurrence-Plots-Kennzahlen (%Determinismus, Divergenz, Entropie, %Recurrence, Ratio) von 24 Stundenmessungen einer 20-30 jährigen Versuchsperson: (1) mit guter nächtlicher Schlafstruktur (2) bei Nacht ohne Schlaf.