

Zur Methodik der kontinuierlichen Bestimmung der Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung*

Herfried Pessenhofer und Thomas Kenner
Physiologisches Institut der Universität Graz, Austria

Eingegangen am 1. Juli 1974

Method for the Continuous Measurement of the Phase Relation between Heart Beat and Respiration

Summary. A simple method for the continuous analysis of the phase relation between heart beat and respiration is described. By means of an analog computer the timing of the *R* wave of the ECG within the respiratory cycle is graphically displayed. In contrast to other investigations, the onset of the inspiration is used as starting signal. The results obtained with the analog computer were completed by a digital computer program, which allowed in addition to calculate histograms of the events. In order to evaluate our method we used an analog model of two coupled oscillators. Responses obtained at different coupling characteristics were compared with measurements in four subjects. The results indicate a mutual interaction between heart action and respiration as cause of the coupling of these two systems.

Key words: Phase Relation — Analog Computer — Cardio-Respiratory System — Pulse-synchronized Respiration — Synchronization.

Verschiedene rhythmische biologische Vorgänge sind, obwohl unterschiedlicher Genese, in Phase und Frequenz aufeinander abgestimmt. Als bekanntes Beispiel ist die Kopplung von Herzschlag und Atmung zu erwähnen, deren Untersuchung zur Aufklärung des unbekanntenen Kopplungsmechanismus von großer Bedeutung erscheint (Bucher u. Bättig, 1960, 1961; Engel *et al.*, 1967/68; Hinderling u. Bucher, 1965/66; Hinderling, 1967; Hinderling *et al.*, 1968).

Von der Annahme ausgehend, daß sich der Atemrhythmus an die Herzaktion anpaßt, wird von allen uns bekannten Autoren einheitlich der Herzschlag als Bezugsrhythmus verwendet. Zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Inspirationsbeginne innerhalb der Herzperiode wird das R-R-Intervall des EKG in eine bestimmte Anzahl von Abschnitten geteilt und die Inspirationsbeginne, die auf die einzelnen Abschnitte entfallen, werden gezählt.

* Diese Arbeit wurde mit Unterstützung des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung durchgeführt.

In dieser Studie wird eine einfache Analogrechenschaltung beschrieben, die die Analyse der Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung ermöglicht, wobei das Inspirationsintervall als Bezugsgröße verwendet wird.

Methodik

A. Theoretische Vorbemerkungen

Sowohl das Herz als auch das Atemzentrum stellen biologische Oszillatoren dar, die zu einer autonomen Rhythmusbildung befähigt sind. Um Phasenbeziehungen zwischen zwei periodischen Vorgängen feststellen zu können, muß man in beiden geeignete Bezugsphasen wählen und deren zeitliche Relation ermitteln. Bei der Untersuchung der Koordination von Herzschlag und Atmung verwendet man mit Vorteil die Spitze der R-Zacke des EKG einerseits und den pneumotachographisch oder thermoelektrisch erfaßbaren Inspirations- oder Expirationsbeginn andererseits. Die Änderung der zeitlichen Relation über eine bestimmte Anzahl von Perioden stellt dann ein Maß für die Koordination der beiden Schwingungen dar.

Das Vorhandensein einer Koordination setzt zwischen den Oszillatoren, die die periodischen Vorgänge erzeugen, einen Kopplungsmechanismus voraus, dessen Funktion darauf gerichtet ist, die Phasenwinkeldifferenz zwischen beiden Schwingungsvorgängen möglichst konstant zu halten. Diese Aufgabe kann nur von einer Phasensteuerung bewältigt werden, die aus einem Koppel-(Steuer-)glied besteht, das in der Lage ist, die Phasen der Schwingungen zu beeinflussen. Eine solche Phasensteuerung schließt immer gleichzeitig eine Frequenzsteuerung mit ein (Wever, 1962, 1963, 1964).

B. Aufbau der Rechenschaltung

Auf dem obengenannten Meßprinzip aufbauend entwickelten wir eine einfache Analogrechenschaltung, die die automatische Aufzeichnung der zeitlichen Lage der R-Zacken innerhalb einer beliebigen Anzahl von Inspirationsintervallen ermöglicht.

Dabei hat es sich zur Charakterisierung der Kopplung als vorteilhaft erwiesen, unmittelbar die Zeitdifferenz zu messen und aufzuzeichnen, wobei als Nullpunkt der Zeitzählung der Inspirationsbeginn verwendet wird. Der Meß- und Registriervorgang wird durch die in Abb. 1 gezeigte Schaltung bewerkstelligt.

Bei Beginn des Inspiriums wird die X-Ablenkung des Plotters ausgelöst. Der Weg in X-Richtung ist proportional der Inspirationsdauer $\Delta t_{\text{Insp.}}$. Der rasche Rücklauf erfolgt mit beginnendem Expirium, während dessen Dauer die Registrierung unterbrochen wird. Durch die Spitze der R-Zacke wird der Betätigungsmagnet des Schreibstiftes ausgelöst, eine einstellbare Wiederholungssperre schränkt die Möglichkeit einer unerwünschten Triggerung durch Störungen im EKG ein. Die Ablenkung in Y-Richtung ist proportional zur laufenden Versuchsdauer t_v .

Dasselbe Meßprinzip wurde zur Ergänzung der beschriebenen Methode auch mit Hilfe eines Digitalcomputers (Hewlett Packard 2100 A) realisiert.

Die über einen AD-Wandler eingelesenen Signale werden nach Auswertung durch das Programm zunächst gespeichert und dann auf Wunsch über einen Analog-XY-Plotter in folgender Weise ausgegeben: Inspirationsbeginn bei $X = 0$. Das Einfallen jeder R-Zacke wird auf der X-Achse im Abstand der seit dem Inspirationsbeginn vergangenen Zeit als Punkt eingetragen. Mit jedem neuen Atemzug rückt der Schreiber auf der Y-Achse um eine Einheit höher. Dieses Digitalprogramm hat den Vorteil, daß die gesamte Atemperiode und nicht nur das Inspirium erfaßt wird.

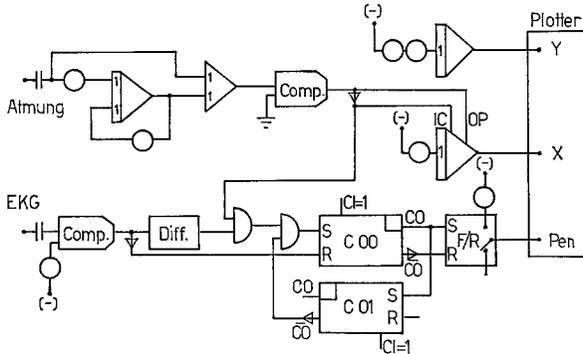


Abb.1. Analogrechenschaltung zur Untersuchung der Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung. Aus dem thermoelektrisch registrierten Atemsignal wird zunächst der Wert $(x-\bar{x})$ gebildet. Sobald diese Größe > 0 ist, wird der Ausgang des nachfolgenden Comparators auf logisch 1 gesetzt. Damit wird der „Mode Control“ des X-Ablenkintegrators gesteuert. Das EKG wird einem Comparator mit einstellbarer Schwelle zugeführt, die so justiert ist, daß jede R-Zacke den Comparatorausgang kurzzeitig auf logisch 1 setzt. Der Differenzierer gibt bei jeder absteigenden Flanke des Comparatorimpulses einen schmalen Rechteckimpuls, synchron mit der „System Clock“ ab, der durch den Counter C 00 verlängert, über ein „Function Relais“ den Schreibstift auslöst. Das erste Und-Gatter verhindert die Schreibstiftauslösung während des Expiriums, das zweite Gatter dient in Verbindung mit Counter C 01 als einstellbare Wiederholungssperre. OP operating mode; IC initial condition mode; S set; R reset; CO carry out; CI carry in. Die verwendeten Symbole entsprechen der Werksnorm der Firma EAI

Darüber hinaus kann auf Wunsch ein Histogramm der Häufigkeitsverteilung der R-Zacken in der Atemperiode ausgegeben werden.

Ein weiteres Programm, das hier nicht näher besprochen werden soll, erlaubt schließlich, den gleichen Vorgang fortlaufend auf einem Direktschreiber festzuhalten, wobei die Zeitintervalle in Y-Richtung aufgetragen werden.

Ergebnisse

A. Ergebnisse am Modell

Um die Schaltung zu erproben und um einige typische Diagramme von Phasenbeziehungen zu demonstrieren, haben wir am Analogrechner ein Modell zweier gekoppelter schwingungsfähiger Systeme aufgebaut. Durch Veränderung der Kopplung zwischen den Systemen, deren Details für diese Darstellung unwesentlich sind, konnten verschiedene Verteilungen der Phasenwinkeldifferenzen der Schwingungen erhalten werden, die mit Hilfe der angegebenen Schaltung untersucht wurden.

Abb. 2a zeigt den Fall einer phasenstarrten Kopplung, das heißt, die „Herzschläge“ fallen immer an denselben Stellen des Inspiriums ein. Eine Kopplung dieser Art ist jedoch bei biologischen Systemen

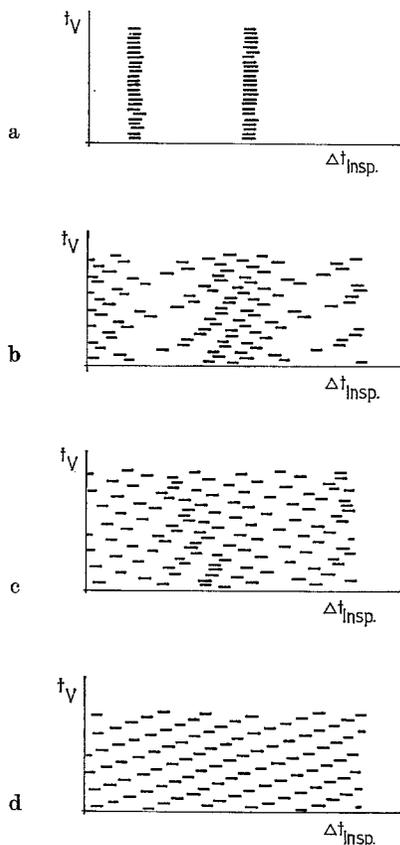


Abb. 2a—d. Darstellung der Phasenbeziehungen zwischen zwei Modellsystemen, Abszisse: Zeitabstand vom „Inspirationsbeginn“, Ordina t_V : Versuchszeit. (a) Starre Kopplung zwischen den Systemen — die Phasenwinkeldifferenz ist über die Versuchsdauer konstant. (b) Feste Kopplung — die Verteilung der Phasenwinkeldifferenz zeigt deutliche Häufungsstellen (c) Lose Kopplung — die Häufungsstellen der Verteilung sind weniger ausgeprägt. (d) Keine Kopplung — gleichmäßige Verteilung der Phasenwinkeldifferenz

kaum zu erwarten. In Abb. 2b gruppieren sich die „Herzschläge“ relativ dicht um bestimmte „bevorzugte“ Phasen des Inspiriums. Eine solche Verteilung resultiert aus einer festen Kopplung zwischen den Systemen. Wird die Kopplung weiter verringert, so erhält man ein Diagramm, wie es die Abb. 2c darstellt: die Gruppierung beginnt sich aufzulösen, ist aber noch erkennbar. Bei dem in Abb. 2d gezeigten Beispiel ist schließlich keine Kopplung zwischen den beiden Systemen vorhanden, die Phasenwinkeldifferenz durchläuft kontinuierlich alle Werte (Schlupf).

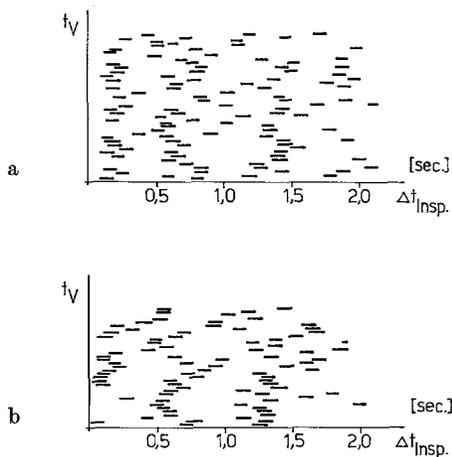


Abb. 3a und b. Darstellung der Phasenbeziehungen zwischen Herzschlag und Atmung am Menschen mit Hilfe des Analogrechners, die Darstellung umfaßt nur die Inspirationsphase. Abszisse: Zeitabstand vom Inspirationsbeginn, Ordinate: Versuchszeit. (a) Verteilung der Phasenwinkeldifferenz bei einer Versuchsperson bei freier Wahl des Atemrhythmus. (b) Verteilung der Phasenwinkeldifferenz bei einer Versuchsperson bei Vorgabe des Atemrhythmus durch ein Metronom (15/min)

B. Ergebnisse am Menschen

Da sich die beschriebene Methode auf Grund der Modellversuche als geeignet zur Darstellung von Phasenzusammenhängen erwiesen hatte, untersuchten wir nun bei vier Versuchspersonen die Phasenwinkeldifferenz zwischen Herzaktion und Atmung in Ruhe.

Bei dem in Abb. 3a dargestellten Versuch atmet die Versuchsperson vollkommen frei und unbeeinflusst, bei dem in Abb. 3b gezeigten Beispiel wurde der Atemrhythmus durch ein Metronom vorgegeben. Die Atemperioden wurden durch Messung des Temperaturumschlages am Naseneingang erfaßt.

In den erhaltenen Diagrammen ist in beiden Fällen deutlich die Gruppierung der Herzschläge um bestimmte Phasen des Inspiriums zu sehen. Sowohl bei freier Atmung als auch bei vorgegebener Atemfrequenz fallen die Herzschläge bevorzugt an drei Stellen des Inspiriums ein. Die Abb. 4a gibt ein Beispiel für die Versuchsauswertung mit Hilfe des Digitalrechners. Bei freier Atmung des Probanden zeigt das Diagramm, das hier die gesamte Atemperiode umfaßt, vier Häufungsstellen, die auch im dazugehörigen Histogramm (Abb. 4b) deutlich zum Ausdruck kommen.

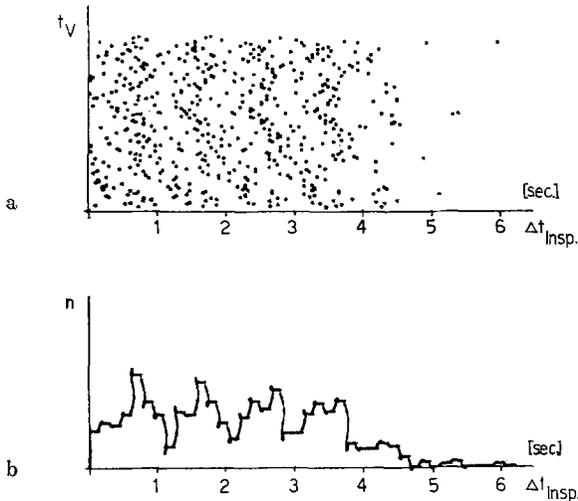


Abb. 4a und b. Darstellung der Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung mit Hilfe des Digitalrechners. Die Darstellung umfaßt die gesamte Atemperiode, so daß auch die respiratorische Arrhythmie deutlich wird. (a) Verteilung der Phasenwinkeldifferenz über die Atemperiode bei freier Wahl des Atemrhythmus, (b) Dazugehöriges Histogramm

Diskussion

Aus den Ergebnissen zeigt sich, daß mit der vorgeschlagenen Methode die Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung ohne Schwierigkeit analysiert werden kann. Darüberhinaus ist die vorgestellte Analogrechen-schaltung leicht mit handelsüblichen Bauteilen zu realisieren.

Aus dem vom Digitalrechner erstellten Histogramm läßt sich, wie von Engel *et al.* (1967/68) für die Verteilung der Inspirationsbeginne im R-R-Intervall durchgeführt, zur Charakterisierung der Kopplung der χ^2 -Wert der Häufigkeitsverteilung der R-Zacken in der Atemperiode berechnen. Jedoch erscheint uns die Bezeichnung dieses Wertes mit „Kopplungsgrad“ unglücklich, da es üblich ist, mit „-grad“ nur Werte zu bezeichnen, die ≤ 1 sind und es außerdem einen Begriff dieses Namens, jedoch völlig anderer Bedeutung bereits gibt.

Es erscheint uns besonders wichtig zu betonen, daß derartige statistische Parameter die Kopplung überhaupt nur ungenügend erfassen. Bei langdauernden Versuchen ist ein ständiger Wechsel zwischen Abschnitten von hoher Konstanz der Phasenwinkeldifferenz zu Abschnitten vollkommener Regellosigkeit zu beobachten. Wesentliche Information über das physiologische Phänomen der Kopplung scheint im Übergang zwischen diesen beiden Stadien zu liegen. Es kann daher neben der

Einfachheit der Methode als ein weiterer Vorteil angesehen werden, daß sie die Möglichkeit bietet, zeitliche Veränderungen der Phasenwinkeldifferenz zu verfolgen. Diese Veränderungen können, wenn sie willkürlich durch Reize provoziert werden, wertvolle Aufschlüsse über das dynamische Verhalten der zwischen den beiden Systemen bestehenden Kopplung liefern.

Bezüglich des Kopplungsmechanismus wird meist die Auffassung vertreten, daß sich der Atemrhythmus an die Herzaktion anpasse (Engel *et al.*, 1967/68; Hinderling, 1967; Hinderling *et al.*, 1968). Aus unseren Versuchen geht jedoch hervor, daß Synchronismen auch bei einer willkürlichen Vorgabe des Atemrhythmus auftreten. Es ist daher denkbar, daß der Kopplungsmechanismus nicht einseitig den Atemrhythmus an den Herzrhythmus anpaßt, sondern daß es sich um einen Mechanismus gegenseitiger Anpassung handelt.

Literatur

- Bucher, K., Bättig, P.: Zur Bedeutung der Vagi für die pulssynchrone Atmung. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **18**, 219—224 (1960)
- Bucher, K., Bättig, P.: Zum Mechanismus der pulssynchronen Atmung *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **19**, 90—96 (1961)
- Engel, P., Hildebrandt, G., Scholz, H.-G.: Die Messung der Phasenkopplung zwischen Herzschlag und Atmung b 28 Menschen mit einem neuen Koinzidenzmeßgerät. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **298**, 258—269 (1967/68)
- Hinderling, P.: Weitere Charakterisierung von Synchronismen zwischen Kreislauf und Atmung. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **25**, 24—31 (1967)
- Hinderling, P., Bucher, K.: Synchronismen zwischen Kreislauf und Atmung am Menschen. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **23**, 374—381 (1965/66)
- Hinderling, P., Ilg, Chr., Bucher, K.: Synchronismen zwischen Kreislauf und Atmung: Der Einfluß künstlicher Beatmung in Hyperventilationsapnoe. *Helv. physiol. pharmacol. Acta* **26**, 171—176 (1968)
- Wever, R.: Zum Mechanismus der biologischen 24-Stunden-Periodik. *Kybernetik* **1**, 139—154 (1962); **1**, 213—231 (1963); **2**, 127—144 (1964)

Dipl.-Ing. Herfried Pessenhofer
 Prof. Dr. med. Thomas Kenner
 Physiologisches Institut
 der Universität
 Mozartgasse 14/I
 A-8010 Graz
 Austria