

# Wirkungen von Sprachtherapie auf die kardiorespiratorische Koordination.

## Teil 1: Synchronisation durch Hexameter-Rezitation

Dirk Cysarz<sup>1,2</sup>, Dietrich von Bonin<sup>3</sup>, Peter Heusser<sup>3</sup>, Maximilian Moser<sup>4,5</sup>, Henrik Bettermann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Lehrstuhl für Medizintechnik und Komplementärmedizin,  
Universität Witten/Herdecke, Deutschland*

<sup>2</sup> *Gemeinschaftskrankenhaus Herdecke, Deutschland*

<sup>3</sup> *Kollegiale Instanz für Komplementärmedizin KIKOM  
Universität Bern, Schweiz*

<sup>4</sup> *Institut für Nichtinvasive Diagnostik,  
Joanneum Research, Weiz, Österreich*

<sup>5</sup> *Institut für Systemphysiologie  
Universität Graz, Österreich*

### **Kurztitel:**

Hexameter-Rezitation und kardioresp. Synchronisation

### **Anschrift:**

Dr. Dirk Cysarz  
Gemeinschaftskrankenhaus Herdecke  
Gerhard-Kienle-Weg 4  
58313 Herdecke  
Tel.: (02330) 62-3637  
Fax: (02330) 62-4062  
Email: d.cysarz@rhythmen.de

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Ergebnisse einer bereits im *American Journal of Physiology* publizierten Studie zur Therapeutischen Sprachgestaltung vorgestellt (1). In einem weiteren Beitrag wird der Versuch unternommen, die Ergebnisse aus der Sicht der anthroposophischen Medizin und Therapie darzustellen. Ziel der Studie war die Analyse der Synchronisation zwischen niederfrequenten Atmungszustellungen und der respiratorischen Sinusarrhythmie (RSA) in der Herzfrequenz während der therapeutisch geleiteten Rezitation von Hexameter-Versen. In einer Querschnittstudie hatten 20 gesunde Probanden drei unterschiedliche Übungen auszuführen: Rezitation von Hexameter-Versen, kontrollierte Atmung und spontane Atmung. Jede Übung wurde in drei aufeinander folgende Messungen eingeteilt: 15-minütige Vorruhe im Sitzen (S1), Durchführung der Übung während 20 Minuten und 15-minütige Effektmessung im Sitzen (S2). Als Grundlage für die Analyse diente die zeitsynchrone Aufzeichnung von Luftfluss durch Nase / Mund und das Elektrokardiogramm. Die Synchronisation zwischen RSA und niederfrequenten Atmungszustellung wurde mit einem Index  $g$  quantifiziert. Dieser Index wurde aus der Analyse schwach gekoppelter chaotischer Oszillatoren übernommen. Während der Hexameter-Rezitation erhöhte sich die kardiorespiratorische Synchronisation in Gestalt (hohe  $g$ -Werte). Während der kontrollierten Atmung war die kardiorespiratorische Synchronisation weniger stark ausgeprägt. Die Vorruhe (S1) und Effektmessung (S2) waren durch eine weitere Verringerung der Synchronisation gekennzeichnet. Und während der spontanen Atmung waren Herzschlag und Atmung fast vollständig desynchronisiert. Diese Ergebnisse resultieren vor allem aus den niederfrequenten Atmungszustellungen die während der therapeutisch geleiteten Rezitation auftraten.

Schlüsselwörter: Herzfrequenz, Atmung, Synchronisation, Therapeutische Sprachgestaltung, Querschnittstudie, Bivariate Datenanalyse

## Effect of anthroposophic therapeutic speech on cardiorespiratory interaction

### Abstract

The aim of this contribution is the presentation of the most important results of a study on Anthroposophic Therapeutic Speech (which was originally published in the *American Journal of Physiology* (1)). Another forthcoming contribution will deal with an elucidation of the results from the point of view of Anthroposophical Medicine and Therapy. Objective of the study was to investigate the synchronization between low frequency breathing patterns and respiratory sinus arrhythmia (RSA) of heart rate during guided recitation of poetry, i.e. recitation of hexameter verse from ancient Greek literature performed in a therapeutic setting. 20 healthy volunteers performed three different types of exercises with respect to a cross-sectional comparison: recitation of hexameter verse, controlled breathing and spontaneous breathing. Each exercise was divided into three successive measurements: a 15-minute baseline measurement (S1), 20 minutes of exercise and a 15-minute effect measurement (S2). Breathing patterns and RSA were derived from respiratory traces and electrocardiograms, respectively, which were recorded simultaneously using an ambulatory device. The synchronization was then quantified by the index  $g$  which has been adopted from the analysis of weakly coupled chaotic oscillators. During recitation of hexameter verse  $g$  was high, indicating prominent cardiorespiratory synchronization. The controlled breathing exercise showed cardiorespiratory synchronization to a lesser extent and all resting periods (S1 and

S2) had even fewer cardiorespiratory synchronization. During spontaneous breathing cardiorespiratory synchronization was minimal and hardly observable. The results were largely determined by the extent of a low frequency component in the breathing oscillations that emerged from the design of hexameter recitation. In conclusion, recitation of hexameter verse exerts a strong influence on RSA by a prominent low frequency component in the breathing pattern, generating a strong cardiorespiratory synchronization.

Keywords: Heart rate, Respiration, Synchronization, Creative arts therapy, Cross sectional study design, Bivariate data analysis

## Einleitung

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Ergebnisse einer bereits im *American Journal of Physiology* publizierten Studie zur Therapeutischen Sprachgestaltung vorgestellt. In einem weiteren Beitrag werden die Ergebnisse aus der Sicht der anthroposophischen Medizin und Therapie betrachtet. – Der Einfluss der Atmung auf die kardiovaskuläre Regulation ist in den letzten Jahren in vielfältiger Weise untersucht worden. Neben der physiologischen Grundlagenforschung wurde auch der Einfluss unterschiedlicher künstlerisch-therapeutischer und religiöser Praktiken auf kardiovaskuläre Parameter untersucht, da diese u.a. die Atmung (bewusst oder unbewusst) stark beeinflussen (2-5). Während des Sprechens des Rosenkranzes oder des ‚OM‘-Mantras konnte eine Frequenzanpassung der Atmungsozillationen mit den endogenen Blutdruckfluktuationen (Mayer-Wellen) und den Oszillationen des cerebralen Blutflusses festgestellt werden (2). Diese Effekte konnten auf die niedrige Atemfrequenz von ca. 6 Atemzügen pro Minute zurückgeführt werden, die durch das Versmaß der religiösen Texte während dieser Praktiken entstand. Weiterhin fand sich unter diesen Bedingungen eine gesteigerte Baroreflex-Sensitivität als Ausdruck aktiverer Blutdruckregulation, so dass auch ein Vorteil für Patienten mit Herzinsuffizienz nicht ausgeschlossen wurde (6). Eine weitere Studie zeigte, dass die arterielle Sauerstoffsättigung bei einer Atemfrequenzen von 6 Atemzügen pro Minute sowohl bei gesunden Probanden als auch bei Patienten mit Herzinsuffizienz am größten ist, verglichen mit einer Atemfrequenz von 15 bzw. 3 Atemzügen pro Minute (7). Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass religiöse und andere Praktiken, in denen die Atemfrequenz stark herabgesetzt wird, auch einen Einfluss auf physiologische Prozesse zur Gesunderhaltung des Organismus besitzen.

Dass Sprachübungen, die einen starken Einfluss auf die Atemrhythmik besitzen, einen gesundenden Einfluss besitzen, ist Sprachtherapeuten bereits seit vielen Jahrzehnten aus eigener Erfahrung bekannt (8). Durch ihre spezifischen Atmungsmodalitäten besitzen viele Sprachübungen einen starken Einfluss auf die Atemrhythmik und üben damit einen starken modulierenden Einfluss auf die autonome Herz-Kreislauf- und Blutdruck-Regulation aus. Dies verbessert die Flexibilität der unterschiedlichen Regulationsprozesse, so dass die unterschiedlichen Funktionen ebenfalls besser aufeinander abgestimmt werden können. Letztlich wird dadurch insbesondere die Entstehung der rhythmische Funktionsordnung als Eigenleistung des Organismus unterstützt (9).

Den vielen Erfahrungen eine wissenschaftliche Grundlage an die Seite zu stellen ist das Anliegen einer Reihe von Studien unserer Arbeitsgruppe zur Wirkung der Therapeutischen Sprachgestaltung auf die kardiovaskuläre und kardiorespiratorische Regulation. Als methodische Grundlage dienen u.a. die Studien zu den Einflüssen unterschiedlicher Atmungsmuster auf die Variationen der Herzfrequenz (10-12). In einer ersten Studie wurde daher die Herzfrequenzvariabilität während und nach der Rezitation von Gedichten untersucht (3-5). Neben dem Hexameter wurde auch Alliteration benutzt, die allerdings keine leicht quantifizierbaren Effekte auf die Herzfrequenzvariabilität zeigte. Auch ohne einen externen Zeitgeber zeigten sich während Hexameter-Rezitation in der Herzfrequenz Frequenzmodulationen von 12 pro Minute und 6 pro Minute. Weiterhin zeigte sich während 15 Minuten nach der Rezitation eine erhöhte ‚high frequency‘-Komponente in der Herzfrequenzvariabilität (HRV), die den Einfluss der Atmung auf die HRV repräsentiert (4). Zur gleichen Zeit waren typische ‚Muster‘ in der Herzfrequenz, die durch cardiorespiratorische Synchronisation entstanden, während der Nachruhezeit deutlich vermehrt (3). Im Gegensatz dazu zeigten sich während und nach normaler Unterhaltung, die als Kontrolle diente, keine spezifischen Effekte.

Aufgrund der Ergebnisse unserer ersten Studie wurde in der vorliegenden Studie die kardiorespiratorische Synchronisation während der Rezitation von Hexameter-Versen analysiert. Als Grundlage für diese Analysen dienten simultane Aufzeichnungen des Herzschlags (Elektrokardiogramm) und des Luftflusses unter der Nase und vor dem Mund. Für die Analyse solcher bivariaten Zeitreihen sind in den letzten Jahren Methoden entwickelt und validiert worden, mit denen eine kardiorespiratorische Synchronisation eindeutig nachweisbar ist (13-15). Mit diesen Methoden können neue Informationen bezüglich der Interaktion dieser Systeme erfasst werden, die durch die alleinige Analyse des Herzschlags oder der Atmung nicht erfassbar sind. Zum Vergleich der drei Übungen (i) Rezitation von Hexameter-Versen, (ii) kontrollierte Atmung und (iii) Spontanatmung wurde als Studiendesign ein Querschnittvergleich gewählt.

Die Erkenntnisse aus dieser Studie können zum besseren Verständnis der Regulationsmechanismen bezüglich Stabilität und Flexibilität des Zusammenspiels von Herzschlag und Atmung beitragen. Eine ausführlichere Beschreibung (auf Englisch) findet sich in (1).

## Material und Methoden

### Probanden

An der Querschnittstudie nahmen 23 gesunde Probanden ohne Vorerfahrungen in der Therapeutischen Sprachgestaltung und ohne vorherige Kenntnis der Hexameter-Verse, die für die Rezitation ausgewählt wurden, teil. Nach einer ersten Untersuchung wurden 3 Probanden wegen häufiger Extrastolen ausgeschlossen. Die verbleibenden 20 Probanden (10 Frauen; Alter:  $43 \pm 6.6$  Jahre, MW  $\pm$  SD; 3 Raucher) wurden in die Studie aufgenommen. Sie hatten keinerlei kardiovaskulären Vorerkrankungen und insbesondere keine Therapien zur Behandlung von zu hohem oder zu niedrigem Blutdruck oder von Arrhythmien. Alle Probanden gaben ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme an der Studie. Das Studienprotokoll wurde von der Ethikkommission der Universität Bern (Schweiz) genehmigt.

### Übungen

Jeder Proband wurde dreimal jeweils zur gleichen Tageszeit in das Studienzentrum (Therapeutikum) eingeladen. In den drei Einheiten wurde je eine der folgenden Interventionen ausgeführt: Rezitation von Hexameter-Versen (H), kontrollierte Atmung (K) und Spontanatmung (S), siehe Tabelle 1. Während jeder Sitzung wurde das Elektrokardiogramm und der nasale/orale Luftfluss zeitsynchron gemessen (siehe auch *Datenerfassung*). Jede Sitzung dauerte 50-60 Minuten und wurde in drei aufeinander folgende Messungen eingeteilt: 15 Minuten Ruhe sitzend auf einem Stuhl (Baseline-Messung S1), 20-minütige Messung der Übung (H, K, S) und wiederum 15 Minuten Ruhe sitzend auf einem Stuhl (Effekt-Messung S2). Während der Messungen S1 und S2 gab es keine Vorgaben für die Atmung (Spontanatmung). Aus diesem Vorgehen ergeben sich 9 Messungen pro Proband. Zur Vergleichbarkeit der physischen Grundaktivität während der drei Übungen liefen die Probanden während jeder Intervention mit 50 Schritten pro Minute durch den Raum (das Schrittempo wurde durch ein Metronom angegeben). Die drei Übungen sollten mindestens 24 Stunden auseinanderliegen, jedoch innerhalb von 14 Tagen stattfinden.

[Tabelle 1 hier einfügen]

Rezitation von Hexameter-Versen:

Der Hexameter ist die älteste Versart, der griechischen Antike. Die große Helden-Dichtungen Homer's, Ilias und Odyssee, sind vollständig in Hexameter-Versen geschrieben. Ein Hexameter-Vers besteht aus 6 (hexa) Versfüßen, in der Regel Daktylen (ein Daktylus besteht

aus einer langen und zwei kurzen Silben). Die Verszeilen werden meistens durch eine Zäsur in zwei Teile geteilt. In der archetypischsten Form, der Ilias, liegt die Zäsur am häufigsten nach der langen Silbe des dritten Daktylus. Daraus resultiert für den Sprecher eine regelmäßige und angenehme Atmung, die eine ideale Grundlage für das momentane Schaffen neuer Verse aus dem inneren Bilderschatz - wie es als Methode für diese Zeit angenommen werden muss - erst ermöglichte. In dieser Studie wurde die deutsche Übersetzung von Heinrich Voß gewählt, da sie die Hexameter-Struktur der Verse beibehält<sup>1</sup>.

Die Rezitation wurde in unseren Untersuchungen mit dem beschriebenen Atemmuster durchgeführt. Der Therapeut ging mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Proband durch den Raum und rezitierte die erste Halbzeile des Hexameter-Verses vor. Zur Koordination der Schrittfolge mit dem Atemmuster wurde während eines Schrittes eingatmet und während drei Schritten rezitiert. Zur Unterstützung einer tiefen Einatmung wurden die Arme während der Einatmung bis auf Schulterhöhe angehoben und während der Rezitation wieder gesenkt. Der Proband hörte der Rezitation während des Gehens zu (ohne während der Einatmung den Arm zu heben) und wiederholte dann die Halbzeile in der Art, wie es der Therapeut vorgemacht hat. Dieses alternierende Vorgehen wurde für 20 Minuten durchgeführt. Die Abwechslung von Zuhören und Rezitieren, das Tempo des Gehens und die Bewegung der Arme ergaben eine hohe zeitliche Koordination dieser Aufgaben.

#### Kontrollierte Atmung:

Die kontrollierte Atmung bestand aus einem der Hexameter-Rezitation entsprechenden Atemmuster, d.h. Einatmung während eines Schrittes, Ausatmung während drei Schritten. Die Dauer der Ausatmung über 3 Schritte wurde durch ‚Lippenbremse‘ kontrolliert. Die Atmung war wiederum durch Anheben der Arme auf Schulterhöhe beim Einatmen und Senken beim Ausatmen unterstützt. Analog zur Rezitation „hörte“ der Proband zuerst auf die Atmung des Therapeuten (ohne während der Einatmung die Arme zu heben), um sie anschließend wiederum in der gleichen Art nachzuahmen.

#### Spontanatmung:

Während der Spontanatmung gingen die Probanden wiederum mit der gleichen Geschwindigkeit durch den Raum wie während der anderen Übungen. Dabei gab es keine Vorgaben in Bezug auf Atmung und Armbewegungen.

#### Datenerfassung

Während der Übungen wurde ein Elektrokardiogramm (EKG, Standardableitung) und der unkalibrierte nasale/orale Luftfluss (gemessen durch drei temperaturabhängige Thermistoren vor Nase und Mund) zeitsynchron mit einem portablen Rekorder aufgezeichnet (Medikorder MK2, Tom-Signal, Graz, Österreich). Die Abtastfrequenz des EKG betrug 3000 Hz, die des Luftflusses 50 Hz. Dadurch konnten die R-Zacken im EKG mit einer Genauigkeit < 1 ms detektiert werden. Die Zeiten des Beginns der Ein- bzw. Ausatmung wurde als Zeiten des

---

<sup>1</sup> Diese epische Dichtung besitzt eine enorme Länge (die Ilias besteht aus fast 16.000 Hexameter-Versen). Sie wurde bei festlichen Anlässen der Griechen in ganzer Länge von speziellen Sängern (Aoiden) rezitiert (31). Dies legt nahe, dass eine harmonisierende, Gesundheits-erhaltende Wirkung sowohl auf den Sänger als auch auf die Zuhörer davon ausgegangen sein muss. Bezüglich der Zäsur gibt es unterschiedliche Meinungen. Diente sie lediglich der Einatmung oder sollten dadurch bestimmte Worte oder Satzteile herausgehoben werden? Wir bevorzugen die erste Interpretation. In der Therapeutischen Sprachgestaltung wird die Zäsur zur Einatmung in der Länge eines Daktylus benutzt. Da jeweils eine halbe Verszeile rezitiert wird, umfasst somit jeder vollständige Atemzug die Länge von 4 Versfüßen (Rezitation: 3 Versfüße, Zäsur bzw. Einatmung: 1 Versfuß). Dieses Verhältnis von 4:1 wird als besonders harmonisch empfunden und findet sich z.B. auch im Durchschnitt als Verhältnis von Puls zu Atmung im Schlaf bei grösseren Probandengruppen.

lokalen Minimums bzw. lokalen Maximums in der Luftflusskurve festgelegt, da diese durch den Temperaturumschlag von ausgeatmeter warmer Luft (erwärmt durch den Respirationstrakt) zu eingeatmeter Umgebungsluft entstanden (bzw. umgekehrt). Für die weitere Analyse wurden die Daten auf einen PC gespeichert und mit Analyse-Programmen unter Matlab (The Mathworks, Natick, Mass, USA) weiterverarbeitet. Alle automatische detektierten R-Zacken wurden visuell kontrolliert und bearbeitet, sofern notwendig. Die manuell geänderten Zeiten von R-Zacken hatten eine Genauigkeit von 5 ms, da das gesamte EKG lediglich mit einer Abtastfrequenz von 200 Hz abgespeichert wurde.

### Datenanalyse

Für die weitere Analyse wurden zuerst die Zeiten der R-Zacken in eine RR-Tachogramm umgewandelt, das ist die Folge der Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden R-Zacken. Da das RR-Tachogramm keine äquidistante Zeitbasis besitzt, wurde diese durch eine Neu-Abtastung der Werte des RR-Tachogramms mit einer Abtastfrequenz von 5 Hz und linear interpolierten Werten erzeugt (RR-Zeitreihe). Zur zeitsynchronen Erzeugung der Zeitreihe des nasalen/oralen Luftflusses wurde jeder 10-te Wert der ursprünglich aufgezeichneten Zeitreihe benutzt. Die auf diese Art erstellten Zeitreihen von Herzschlag und Atmung teilen eine gemeinsame Zeitachse und dienen als Grundlage für die weiteren Analysen.

In Abbildung 1 (A) ist ein kurzer Ausschnitt der RR-Zeitreihe und der nasalen/oralen Atemkurve während der Rezitation von Hexameter-Versen zu sehen. Deutlich ist in der RR-Zeitreihe eine Oszillation mit einer Frequenz von ca. 6 pro Minute zu sehen. Die Atemkurve enthält zwei unterschiedliche Frequenzen. Eine hohe Frequenz von ca. 12 pro Minute ist auf das Design der Hexameter-Rezitation zurückzuführen (theoretisch ergeben sich bei vier Schritten pro Atemzyklus und einer Schrittfrequenz von 50 pro Minute 12.5 Atemzüge pro Minute). Diese schnelle Oszillation wird überlagert von einer langsameren mit einer Frequenz von ca. 6 pro Minute. Diese langsamere Oszillation gibt den Wechsel zwischen Zuhören und Rezitieren beim Probanden wieder: vor dem Rezitieren muss tief Luft geholt werden, so dass eine große Atemamplitude entsteht. Während des Zuhörens reicht eine kleinere Atemamplitude aus. Auffällig ist, dass die Maxima der großen Atemamplituden mit den Minima der RR-Zeitreihe zusammenfallen. Ein Ausschnitt aus der Ruhephase vor der Rezitation ist in Abbildung 1 (B) dargestellt. Die RR-Zeitreihe zeigt wiederum eine Oszillation mit einer Frequenz von ca. 6 pro Minute zu sehen, die allerdings unregelmäßiger als während der Rezitation ist. Die Atemkurve zeigt eine leicht schwankende Frequenz, die über 12 pro Minute liegt. Im Gegensatz zur Rezitation sind die Amplituden der Atemkurve nahezu konstant.

Aus Abbildung 1 (A) wird deutlich, dass die niederfrequente Komponente der Oszillationen in der RR-Zeitreihe und der Atemkurve zur Analyse der Synchronisation von Herzschlag und Atmung relevant ist. Aus diesem Grund wurden beide Zeitreihen mit einem Bandpass gefiltert, so dass lediglich die niederfrequente Oszillation in der Zeitreihe erhalten bleibt (Details zur Filterung siehe (1)). Abbildung 1 (C) zeigt das Ergebnis der Filterung: während der Rezitation ist die Synchronisation zwischen der niederfrequenten Oszillation in der Atemkurve und der Oszillation in der RR-Zeitreihe unmittelbar ersichtlich. Zum Vergleich sind in Abbildung 1 (D) die gefilterten Zeitreihen in der Ruhephase vor der Rezitation dargestellt. Es ist wiederum unmittelbar ersichtlich, dass Herzschlag und Atmung nicht synchronisiert sind.

Auf der Grundlage der gefilterten Zeitreihen von Herzschlag und Atmung kann somit die kardiorespiratorische Synchronisation analysiert werden. Im folgenden wird nur die grundlegende Idee dieser Analyse kurz vorgestellt, eine detaillierte Darstellung findet sich in

(1). Der Ursprung dieser Analysen liegt in der Analyse zweier schwach gekoppelter chaotischer Systeme (16;17). Ausgangspunkt für die Analyse der Synchronisation ist die adäquate Definition der Phase für die Zeitreihen von Herzschlag und Atmung. Da die Zeitreihen gefiltert sind, kann hierzu die Hilbert-Transformation herangezogen werden. Nach Berechnung der Phase für jeden Zeitpunkt der beiden Zeitreihen kann die Phasendifferenz berechnet werden. Wenn diese Phasendifferenz konstant ist, liegt eine Synchronisation vor. Für physiologische Zeitreihen reicht die Berechnung der Phasendifferenz zur Bestimmung von Synchronisation aber noch nicht aus, da mit Störungen zu rechnen ist. Aus diesem Grund wird der Mittelwert betrachtet, um den die Phasendifferenz schwankt. Gibt es einen eindeutigen, stabilen Mittelwert, dann liegt eine Synchronisation zwischen Herzschlag und Atmung vor. Quantitativ wird dies durch einen Wert  $g$  erfasst. Der Wert von  $g$  liegt zwischen 0 und 1. Für  $g = 1$  liegt ein stabiler Mittelwert vor, Herzschlag und Atmung sind perfekt synchronisiert. Nimmt die Synchronisation ab, so sinkt der Wert von  $g$ . Für eine vollständige Desynchronisation ergibt sich ein theoretischer Wert von  $g = 0$ . Aufgrund der Störungen in den Zeitreihen von Herzschlag und Atmung hat sich jedoch gezeigt, dass praktisch bereits bei einem Wert von  $g \leq 0.14$  eine vollständige Desynchronisation von Herzschlag und Atmung vorliegt. Die Berechnung dieses Synchronisations-Indexes  $g$  für die Beispiele in Abbildung 1 (B) und (D) ergibt  $g = 0.97$  (sehr hoher Grad an Synchronisation) bzw.  $g = 0.15$  (fast keine Synchronisation). Mit diesem Verfahren wird der Grad der kardiorespiratorischen Synchronisation korrekt quantifiziert.

## Statistik

Ziel dieser Studie war, die kardiorespiratorische Synchronisation während der Rezitation von Hexameter-Versen zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden deskriptive Methoden benutzt. Da die Anzahl der in die Studie eingeschlossenen Probanden klein ist ( $N=20$ ) und die Verteilung der  $g$ -Werte nicht bekannt ist, wird der Median statt des Mittelwertes zur Quantifizierung der Werte-Verteilungen berechnet. Die mediane Herzfrequenz, der Median der niederfrequenten Atmungsszillation in der Atemkurve und der Synchronisationsindex  $g$  wurde für jede Messung der einzelnen Probanden berechnet. Zur Minimierung von Übergangseffekten wurden in jeder Messung die ersten beiden Minuten ausgelassen. Die darauf folgenden 13 Minuten wurden analysiert, so dass ein Bias aufgrund der Auswertung unterschiedlicher Messungsdauern vermieden wurde. Lediglich 7 von 180 Messungen (20 Probanden  $\times$  3 Übungen  $\times$  3 Messungen pro Übung) waren kürzer als 13 Minuten. Anschließend wurden die drei Messungen jeder Übung (S1, Übung, S2) durch den Median, das untere und obere Quartil, der medianen Herzfrequenz, medianen Frequenz der niederfrequenten Komponente der Atemkurve und des Ausmaßes der RSA quantifiziert. Sogenannte Box- und Whisker-Plots wurden für die Darstellung der Verteilungen dieser Parameter gewählt.

Zur quantitativen Abschätzung der Unterschiede zwischen den drei Messungen während einer Therapiesitzung (S1, Übung, S2) und auch zwischen den drei Übungen (Hexameter-Rezitation, kontrollierte Atmung, Spontanatmung) wurde der nicht-parametrische Friedman-Test benutzt. Anschließend wurde ein adäquater post-hoc Test für multiple Vergleiche herangezogen, so dass die Unterschiede zwischen den drei Messungen während einer Therapiesitzung bzw. zwischen den drei Übungen quantifiziert werden konnten (18). Ein Wert  $p_{\text{Friedman}}$  nahe 0 entspricht einer hohen Wahrscheinlichkeit, dass Unterschiede zwischen den drei Messungen bestehen. Für niedrige Werte von  $p_{\text{Friedman}}$  zeigen niedrige Werte des post-hoc Test an, zwischen welchen Messungen die Unterschiede bestehen.

## Ergebnisse

Insgesamt wurden 180 Messungen hinsichtlich der kardiorespiratorischen Synchronisation analysiert. Alle Übungen waren durch einen Anstieg der Herzfrequenz gegenüber der Vorruhe (S1) und der Effektmessung (S2) gekennzeichnet, vgl. Tabelle 2. Die Hexameter-Übung zeigte die höchste Herzfrequenz (82.9 1/min). Weiterhin war während der Effektmessung (S2) nach allen drei Übungen die Herzfrequenz niedriger als während der Vorruhe (S1). Die Frequenz der niederfrequenten Atmungszustellungen in der Atemkurve nahm im Vergleich zu S1 und S2 während der Hexameter-Rezitation ab (auf eine Frequenz von 6.4 1/Min), vgl. Tabelle 3. Während der Spontanatmung stieg diese Frequenz im Vergleich zu S1 und S2 an (auf eine Frequenz von 12.5 1/Min). Die Messungen S1 und S2 zeigten in dieser Atmungszustellung Frequenzen zwischen den genannten Extremen (ca. 8.5 1/Min).

[Tabelle 2 und 3 hier einfügen]

Die Ergebnisse der quantitativen Analyse der kardiorespiratorischen Synchronisation sind in Abbildung 2 dargestellt. In den Diagrammen (A)-(C) sind die drei aufeinander folgenden Messungen jeder Übung miteinander verglichen. Es zeigt sich deutlich, dass die Rezitation von Hexameter-Versen und die kontrollierte Atmung zu einem Anstieg der  $g$ -Werte führte, also das Ausmaß der kardiorespiratorischen Synchronisation größer wurde. Der Anstieg war am größten für die Hexameter-Rezitation (Hexameter-Rezitation: Median  $g = 0.70$ , kontrollierte Atmung: Median  $g = 0.57$ ). Für beide Übungen zeigte sich im Vergleich S1 vs. Übung und Übung vs. S2 ein niedriger p-Wert. Aus diesem Grund kann während dieser Übungen von einem höheren Grad kardiorespiratorischer Synchronisation im Vergleich zu Vorruhe (S1) und Effektmessung (S2) ausgegangen werden. Ein entgegengesetztes Ergebnis zeigt die Spontanatmung. Im Vergleich zu S1 und S2 nimmt der Grad der kardiorespiratorischen Synchronisation während der Spontanatmung ab (Median:  $g = 0.15$ ). Der niedrige  $g$ -Wert zeigt an, dass während der Spontanatmung praktisch keine kardiorespiratorische Synchronisation vorliegt bzw. Herzschlag und Atmung vollständig desynchronisiert sind. Dies wird durch die niedrigen p-Werte der Vergleiche S1 vs. Spontanatmung und Spontanatmung vs. S2 bestätigt. Die Vorruhe (S1) und die Effektmessung (S2) sind durch einen Synchronisationsgrad gekennzeichnet, der etwas höher ist als während der Spontanatmung ( $g \approx 0.3$ ).

In Abbildung 2 (D) wird der Grad der Synchronisation während der drei Übungen miteinander verglichen. Der relativ niedrige p-Wert des Vergleichs zwischen den  $g$ -Werten während der Hexameter-Rezitation und den  $g$ -Werten während der kontrollierten Atmung macht deutlich, dass das Ausmaß der Synchronisation während der Hexameter-Rezitation höher liegt als das Ausmaß während der kontrollierten Atmung. Da während der Spontanatmung Herzschlag und Atmung fast vollständig desynchronisiert sind, ergeben die Vergleiche zur Hexameter-Rezitation und zur kontrollierten Atmung selbstverständlich sehr niedrige p-Werte. Da diese Werte ebenfalls niedriger sind als die  $g$ -Werte während der Vorruhe oder während der Effektmessung, desynchronisiert diese Übung Herzschlag und Atmung.

[Abbildung 2 hier einfügen]

## Diskussion

In dieser Studie wurde die kardiorespiratorischen Synchronisation während der Rezitation von Hexameter-Versen untersucht. In der Therapeutischen Sprachgestaltung wird diese Übung zur

Harmonisierung und Stärkung der rhythmischen Funktionen benutzt. Dieses Ziel wird durch die therapeutisch geleitete Rezitation von Versen erreicht. Die Atmung wird durch das Versmaß, die Koordination von Rezitation mit dem Gehen, und den Wechsel zwischen Zuhören und Rezitieren stark beeinflusst. Mit Blick auf die Synchronisation von Herzschlag und Atmung ergab diese Studie die folgende Klassifikation. (A) Während der Rezitation von Hexameter-Versen synchronisierte sich die Herzfrequenz in hohem Grad mit der niederfrequenten Oszillation in der Atemfrequenz, die durch das therapeutische Vorgehen entsteht. (B) Die kontrollierte Atmung führte ebenfalls zu einer kardiorespiratorischen Synchronisation, allerdings in geringerem Ausmaß als während der Hexameter-Rezitation. (C) Die Vorruhe und die Nachruhe zeigten ein noch geringes Maß an Synchronisation. (D) Während der Spontanatmung waren Herzschlag und Atmung fast vollständig desynchronisiert. Die rhythmische Rede hat den stärksten Einfluss auf die Synchronisation zwischen der Herzfrequenz und den niederfrequenten Oszillationen der Atmung, während die Interaktion zwischen Herzschlag und Atmung während alltäglicher Aktivitäten selten synchronisiert ist.

Diese Form der Synchronisation hat ihren Ursprung in der Modulation der Herzfrequenz durch die Atmung, die sogenannte respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) (10). Im Bereich der Atemfrequenzen  $>0.15$  Hz, also während normaler Atmung, sind die Latenzen der Antworten der Herzfrequenz und die zugehörigen Abklingkonstanten der vagalen kardialen Efferenzen wesentlich kleiner verglichen mit denen des sympathischen Teils (19). Aus diesem Grund kann das Ausmaß der RSA als ein Index der Aktivität des parasympathischen Teils des autonomen Nervensystems gewertet werden (20). Aber auch der sympathische Ast des autonomen Nervensystems kann während der Atmung mit normaler Frequenz einen Beitrag zur RSA liefern (21). Das Ausmaß der RSA ist abhängig von der Atemfrequenz und – amplitude. Wenn die Atemfrequenz konstant ist, dann steigt das Ausmaß der RSA mit ansteigendem Atemminutenvolumen (12). Bei konstantem Atemminutenvolumen haben viele Studien übereinstimmend festgestellt, dass die RSA bei einer Atemfrequenz  $<0.15$  Hz am stärksten ist (11;22;23). Ein weiterer Einflussfaktor auf die RSA ist mentaler Stress, er verringert die RSA. Lautes Lesen verringert die Atemfrequenz, so dass die RSA wiederum ansteigt (11). Auch ist die RSA stärker, wenn einer kurzen, schnellen Einatmung eine langsamere Ausatmung folgt (24). Bemerkenswert ist weiterhin, dass während des Sprechvorgangs die physiologischen Anforderungen an den Gasaustausch in den Lungen erheblich überschritten werden dürfen (25;26). Dieser Effekt wird durch die ausgeprägte RSA wenigstens partiell kompensiert, indem sich durch erhöhte RSA der Gasaustausch in den Lungen verbessert (27;28). Diese kurze und keineswegs vollständige Beschreibung der involvierten physiologischen Prozesse mag einen Eindruck von der Komplexität der zu berücksichtigenden Interaktionen geben.

Während der Rezitation von Hexameter-Versen sind alle genannten Einflüsse zu berücksichtigen. Eine gewisse mentale Aktivität ist zur angemessenen Rezitation erforderlich. Das Gehen durch den Raum während der Rezitation erforderte physische Aktivität. Diese beiden Aktivitäten tragen zur Erhöhung der Herzfrequenz bei. Andererseits zeigte sich in der Atemfrequenz eine Oszillation mit einer Frequenz von etwa 6 pro Minute, also der halben Atemfrequenz, die durch die spezifische Art und Weise der Rezitation hervorgerufen wurde. Diese Oszillation entstand durch den Wechsel von Zuhören und Rezitieren: während der Rezitation war die Atemamplitude größer als während des Zuhörens (vgl. Abbildung 1A). Im Gegensatz zur physischen und mentalen Aktivität führte diese Oszillation zu einer stärkeren Ausprägung der RSA. Dieser Effekt kompensierte nicht nur die Reduktion der RSA durch physische und mentale Aktivität, sondern er war deutlich stärker, so dass sich die RSA erhöhte, statt, wie zu erwarten, erniedrigte. Die Analyse der kardiorespiratorischen

Synchronisation zeigte, dass während der Hexameter-Rezitation die RSA mit der niederfrequenten Atmungsszillation synchronisiert ist.

Die Entstehung der kardiorespiratorischen Synchronisation während einer regelmäßigen Atmung bei einer niedrigen Frequenz kann durch die regelmäßigen Wechsel von anregenden und hemmenden Einflüssen des zentralen Atmungsgenerators auf die vagale und sympathische Aktivität erklärt werden. Überraschend ist, dass die normale Atemfrequenz bei etwa 12 pro Minute die fortlaufende Herzfrequenz nur sehr schwach moduliert hat. Die niederfrequenten Modulationen des vagalen und sympathischen Teils des Nervensystems scheinen die höherfrequenten Modulationen aufzuheben. Dieser Effekt wäre aufgrund des lokalen Maximums der kardiorespiratorischen Transfer-Funktion bei niedrigen Frequenzen (ca. 0.1 Hz) verständlich (20). Allerdings ist eine vollständige Angabe aller physiologischen Bedingungen zur Entstehung der kardiorespiratorischen Synchronisation nicht möglich, da noch nicht alle Einflüsse des zentralen und des peripheren Nervensystems an der Entstehung der RSA bekannt sind (20;29). Darüber hinaus scheinen andere Regulationsmechanismen, beispielsweise die Optimierung des Gasaustausches und der Anstieg des arteriellen Sauerstoffsättigung (28), ebenfalls eine Bedeutung für die Entstehung der kardiorespiratorischen Synchronisation zu haben.

Die genannten Bedingungen für die Entstehung der kardiorespiratorischen Synchronisation während Hexameterrezitation gelten in gleicher Weise auch für die kontrollierte Atmung. Allerdings ist der Grad der Synchronisation hier überraschenderweise geringer, obwohl die kontrollierte Atmung dem Atemmuster während Hexameter-Rezitation angepasst wurde. Dies könnte z.B. durch ein leicht höheres Atemminutenvolumen während der Hexameter-Rezitation begründet sein. Diese Vermutung lässt sich leider nicht überprüfen, da die dazu notwendige technische Apparatur (Atemmaske) die Rezitation zu stark behindert. Während Spontanatmung trat keine niederfrequente Komponente in der Atmung auf. Dadurch konnte die Reduktion der RSA durch die physische und mentale Aktivität nicht kompensiert werden. Aus diesem Grund trat fast keine kardiorespiratorische Synchronisation auf. Während der Vorruhe und der Effektmessung (Nachruhe) war der Grad der Synchronisation etwas höher als während der Spontanatmung, obwohl keinerlei Vorgaben bzgl. der Atmung gemacht wurden. Dieses Ergebnis kann durch die im Vergleich zur Spontanatmung verminderte physische Aktivität verstanden werden. Durch diesen Faktor sank die Herzfrequenz, gleichzeitig konnte die Atmung diese leichter modulieren. Im Prinzip stehen unsere Ergebnisse im Einklang mit den Ergebnissen einer anderen Studie, nach der das Ausmaß der kardiorespiratorischen Synchronisation mit sinkender Atemfrequenz steigt (30). Allerdings wurde dort lediglich die Atemfrequenz variiert, während in der vorliegenden Studie neben der Atemfrequenz auch die physische Aktivität zu beachten ist. Eine Studie, in der die Einflüsse beider Faktoren auf die kardiorespiratorische Synchronisation untersucht wurde, liegt bislang nicht vor.

Im Gegensatz zu der von uns zuvor durchgeführten Studie, in der signifikant mehr spezifische Atemmuster in der fortlaufenden Herzfrequenz vor und nach der Hexameter-Rezitation gefunden wurden (3), zeigte sich in dieser Studie nach der Rezitation (Effektmessung) keine Häufung solcher Muster. Die einmalige Hexameter-Rezitation hatte hier noch keinen fortdauernden Einfluss auf die kardiorespiratorische Synchronisation während der Nachruhe. Allerdings hat auch die vorangegangene Studie erst nach einer 2-3-wöchigen Übungsphase deutliche Immediateffekte während der Nachruhe gezeigt. Ein wesentlicher Unterschied zur zuvor durchgeführten Studie besteht darin, dass die spezifischen Muster in der fortlaufenden Herzfrequenz durch eine kardiorespiratorische Interaktion entstanden, bei der die Atemfrequenz weit oberhalb von 0.1 Hz lag. In der vorliegenden Studie wurde dagegen die

kardiorespiratorische Synchronisation bei einer Frequenz von etwa 0.1 Hz untersucht. Es ist daher zu vermuten, dass dauerhafte Effekte von Hexameter-Rezitation auf Herzfrequenzvariabilität und kardiorespiratorische Interaktion erst nach einer gewissen Übungszeit entstehen.

Das Rezitieren von Hexameter-Versen vermag Herzschlag und Atmung zu synchronisieren, ‚in Einklang‘ zu bringen. Da die niederfrequente Oszillation in der Atmung bei etwa 0.1 Hz liegt (Periodendauer: 10 Sekunden), wird neben den Mechanismen zu Regulation des Herz-Kreislaufs auch die Regulation des Blutdrucks angeregt. Ähnliche physiologische Effekte können auch z.B. durch ein Ausdauer-Training erreicht werden (z.B. Dauerlauf). Allerdings bedeutet ein Ausdauer-Training eine relativ einseitige Aktivierung der physischen Seite des Organismus, der wenig Raum für seelische Anregungen (z.B. die Schönheit der Natur) lässt. Im Gegensatz dazu steht das Lesen von Gedichten, das zwar eine reichhaltige seelische Anregung bewirken kann, dafür aber kaum Wirkungen auf die Physiologie besitzt. Die Rezitation von Hexameter-Versen, so wie sie in der Therapeutischen Sprachgestaltung benutzt wird, berücksichtigt und harmonisiert diese beiden Aspekte. Das Sprechen der Verse regt seelisch an, gleichzeitig werden ein Reihe physiologischer Prozesse angeregt, die letztlich gesundheitsfördernd wirken. In diesem Sinne sind die vielen Bemerkungen der Probanden verständlich, nach denen die kontrollierte Atmung als ‚langweilig‘ bezeichnet wurde. Bei kontrollierter Atmung ist zwar wiederum eine physiologische Anregung feststellbar, die seelische fehlt allerdings. Dadurch schwand bei den Probanden letztendlich die Motivation, die Übung weiter auszuführen. Im Gegensatz dazu ‚erfrischte‘ die Rezitation und vermochte eine ‚ruhige und klare‘ Stimmung hervorzurufen. Die seelische Anregung der Rezitation ist hier ebenso präsent wie die physiologische.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die therapeutisch geleitete Rezitation von Hexameter-Versen eine niederfrequente Oszillation in der Atmung hervorrief, die einen hohen Grad Synchronisation zum Herzschlag zeigte. Auch wenn die physiologischen Ursprünge dieser Synchronisation noch nicht vollständig bekannt sind, deuten diese Effekte, zusammen mit den Ergebnissen anderer Studien, eindeutig darauf hin, dass die Rezitation von Hexameter-Versen einen positiven Effekt auf die Blutdruckregulation hat. Dies bei Patienten mit Bluthochdruck (essentielle Hypertonie) nachzuweisen, ist Ziel einer weiteren Studie.

Aus der wissenschaftlichen Sicht ist die therapeutisch geleitete Hexameter-Rezitation eine wirkungsvolle Art, verschiedenen Regulationen des Herz-Kreislaufs im positiven Sinn anzuregen. Die Art und Weise, die Konzeption dieser Übung – und damit einhergehend auch deren Wirkungsweise – ist nicht zu trennen von einem anthroposophischen Verständnis des Menschen. Dementsprechend können die Ergebnisse dieser Studie ebenfalls mit Hilfe des anthroposophischen Menschenverständnisses betrachtet werden. Diese Aspekte sollen in einem weiteren Beitrag ausgeführt werden.

## Danksagung

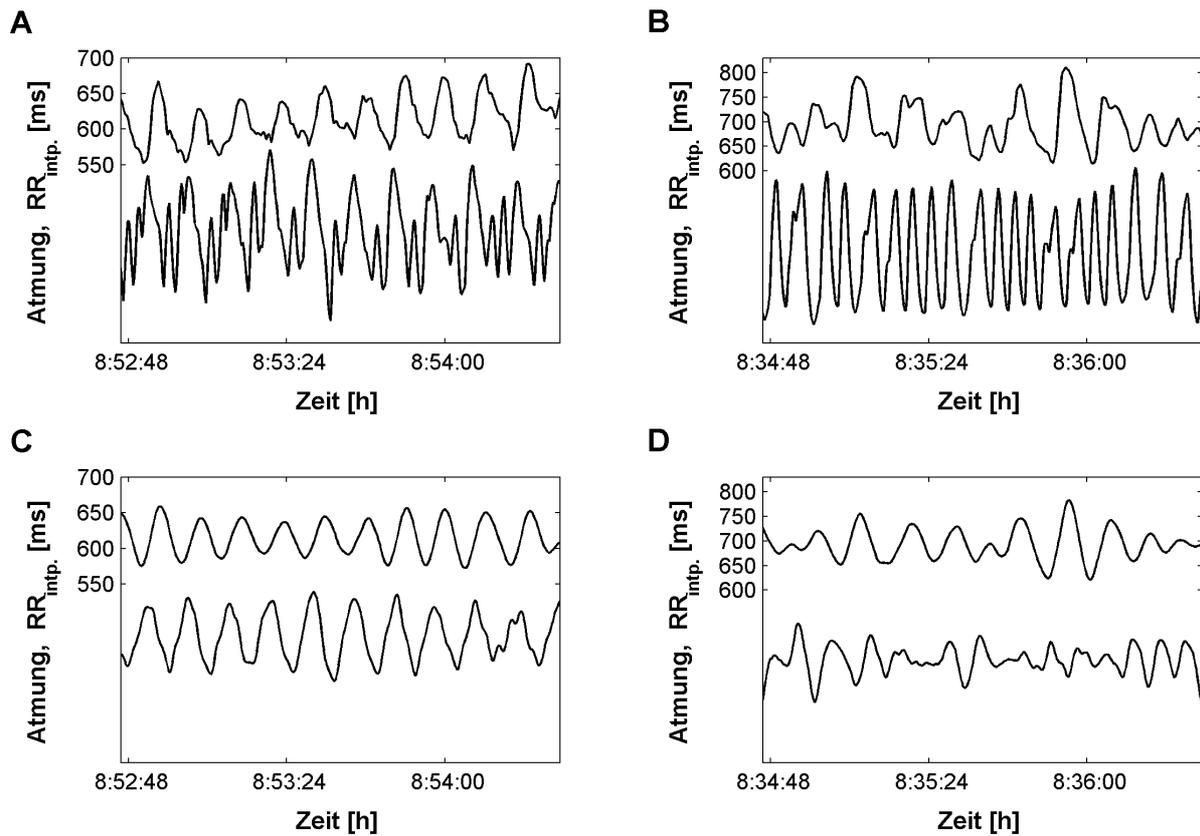
Diese Arbeit wurde finanziell von der Weleda AG, Deutschland (DC, DvB) und der Wala AG (DvB), Deutschland unterstützt.

## Literatur

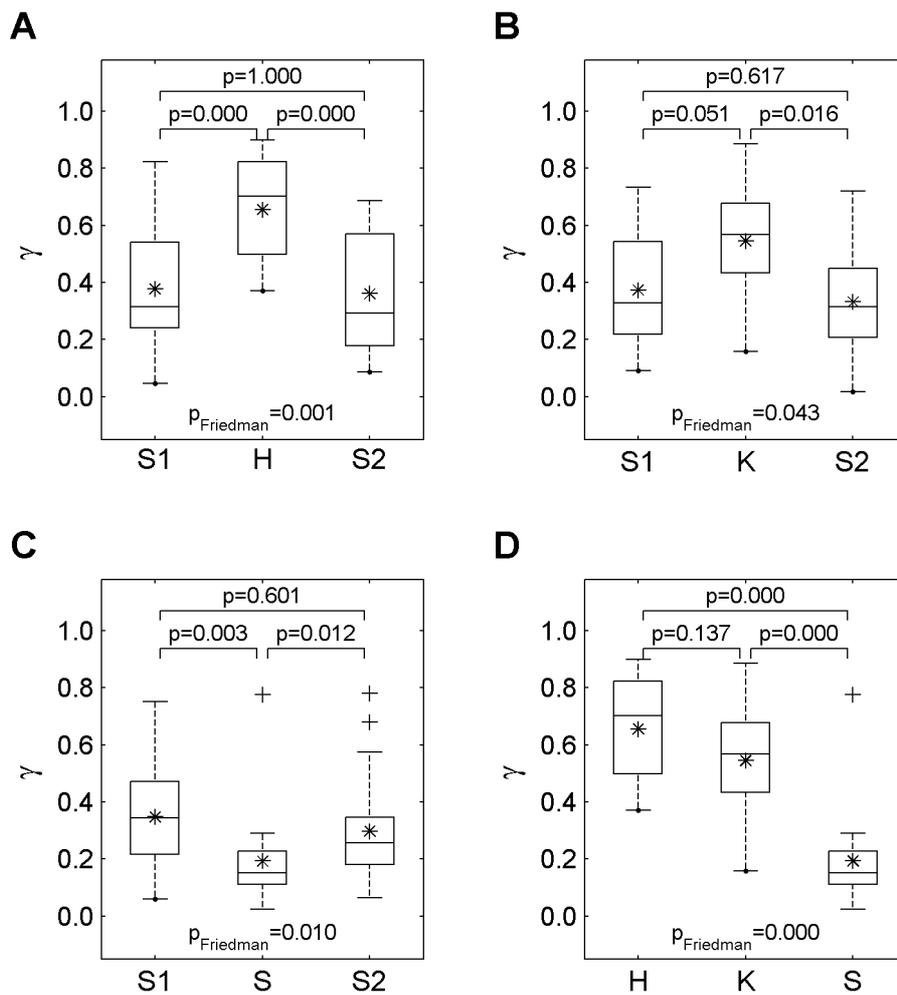
1. Cysarz D, von Bonin D, Lackner H, Heusser P, Moser M, Bettermann H. Oscillations of heart rate and respiration synchronize during poetry recitation. *Am.J.Physiol.Heart Circ.Physiol.* 2004; 287(2): H579-H587.

2. Bernardi L, Sleight P, Bandinelli G et al. Effect of rosary prayer and yoga mantras on autonomic cardiovascular rhythms: comparative study. *BMJ* 2001; 323(7327): 1446-1449.
3. Bettermann H, von Bonin D, Frühwirth M, Cysarz D, Moser M. Effects of speech therapy with poetry on heart rate rhythmicity and cardiorespiratory coordination. *Int.J.Cardiol.* 2002; 84(1): 77-88.
4. von Bonin D, Frühwirth M, Heusser P, Moser M. Effects of speech therapy with poetry on heart rate variability and well-being. *Forsch.Komplementarmed.Klass.Naturheilkd.* 2001; 8(3): 144-160.
5. von Bonin,D, Frühwirth M, Heusser P, and Moser M. Signaturen der therapeutischen Sprachgestaltung in der Herzfrequenzvariabilität. Tycho de Brahe-Jahrbuch für Goetheanismus. Niefern-Öschelbronn: Tycho Brahe-Verlag, 2002.
6. Bernardi L, Gabutti A, Porta C, Spicuzza L. Slow breathing reduces chemoreflex response to hypoxia and hypercapnia, and increases baroreflex sensitivity. *J.Hypertens.* 2001; 19(12): 2221-2229.
7. Bernardi L, Spadacini G, Bellwon J, Hajric R, Roskamm H, Frey AW. Effect of breathing rate on oxygen saturation and exercise performance in chronic heart failure. *Lancet* 1998; 351( 1308-1311).
8. Denjean,B, von Bonin D. Therapeutische Sprachgestaltung. Stuttgart: Urachhaus, 2000.
9. Hildebrandt G. Hygiogenese. *Therapiewoche* 1977; 27( 5384-5397).
10. Angelone A, Coulter NA. Respiratory sinus arrhythmia: a frequency dependent phenomenon. *J.Appl.Physiol.* 1964; 19(3): 479-482.
11. Bernardi L, Wdowczyk-Szulc J, Valenti C et al. Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *J.Am.Coll.Cardiol.* 2000; 35(6): 1462-1469.
12. Hirsch JA, Bishop B. Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing patterns modulates heart rate. *Am.J.Physiol.* 1981; 241( H620-H629).
13. Rosenblum M, Pikovsky A. Synchronization: from pendulum clocks to chaotic lasers and chemical oscillators. *Contemporary Physics* 2003; 44(5): 401-416.
14. Schäfer C, Rosenblum MG, Kurths J, Abel HH. Heartbeat synchronized with ventilation. *Nature* 1998; 392(6673): 239-240.
15. Schäfer C, Rosenblum MG, Abel HH, Kurths J. Synchronization in the human cardiorespiratory system. *Phys.Rev.E* 1999; 60(1): 857-870.
16. Rosenblum MG, Pikovsky AS, Kurths J. Phase synchronization of chaotic oscillators. *Phys.Rev.Lett.* 1996; 76(11): 1804-1807.
17. Rosenblum MG, Kurths J, Pikovsky AS, Schäfer C, Tass P, Abel HH. Synchronization in noisy systems and cardiorespiratory interaction. *IEEE Eng.Med.Biol.Mag.* 1998; 17(6): 46-53.
18. Bortz,J, Lienert GA, and Boehnke K. Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Berlin: Springer, 2000.
19. Eckberg DL. Human sinus arrhythmia as an index of vagal cardiac outflow. *J.Appl.Physiol.* 1983; 54(4): 961-966.

20. Berntson GG, Cacioppo JT, Quigley KS. Respiratory sinus arrhythmia: autonomic origins, physiological mechanisms, and psychophysiological implications. *Psychophysiology* 1993; 30(2): 183-196.
21. Taylor JA, Myers CW, Halliwill JR, Seidel H, Eckberg DL. Sympathetic restraint of respiratory sinus arrhythmia: implications for vagal-cardiac tone assessment in humans. *Am.J.Physiol.Heart Circ.Physiol.* 2001; 280(6): H2804-H2814.
22. Pitzalis MV, Mastropasqua F, Massari F et al. Effect of respiratory rate on the relationships between RR interval and systolic blood pressure fluctuations: a frequency-dependent phenomenon. *Cardiovasc.Res.* 1998; 38(2): 332-339.
23. Stark R, Schienle A, Walter B, Vaitl D. Effects of paced respiration on heart period and heart period variability. *Psychophysiology* 2000; 37(3): 302-309.
24. Strauss-Blasche G, Moser M, Voica M, McLeod DR, Klammer N, Marktl W. Relative timing of inspiration and expiration affects respiratory sinus arrhythmia. *Clin.Exp.Pharmacol.Physiol.* 2000; 27(8): 601-606.
25. Bunn JC, Mead J. Control of ventilation during speech. *J.Appl.Physiol.* 1971; 31(6): 870-872.
26. Phillipson EA, McClean PA, Sullivan CE, Zamel N. Interaction of metabolic and behavioral respiratory control during hypercapnia and speech. *Am.Rev.Respir.Dis.* 1978; 117(5): 903-909.
27. Giardino ND, Glenny RW, Borson S, Chan L. Respiratory sinus arrhythmia is associated with efficiency of pulmonary gas exchange in healthy humans. *Am.J.Physiol.Heart Circ.Physiol.* 2003; 284(5): H1585-H1591.
28. Hayano J, Yasuma F, Okada A, Mukai S, Fujinami T. Respiratory sinus arrhythmia: A phenomenon improving pulmonary gas exchange and circulatory efficiency. *Circulation* 1996; 94(4): 842-847.
29. Piepoli M, Sleight P, Leuzzi S et al. Origin of respiratory sinus arrhythmia in conscious humans: An important role for arterial carotid baroreceptors. *Circulation* 1997; 95(7): 1813-1821.
30. Porta A, Guzzetti S, Montano N et al. Information domain analysis of cardiovascular variability signals: evaluation of regularity, synchronisation and co-ordination. *Med.Biol.Eng.Comput.* 2000; 38(2): 180-188.
31. Latacz,J. Troja und Homer. Berlin: Koehler und Amelang, 2001.



**Abb. 1:** (A) Zeitreihen von Herzschlag (interpolierte Abstände zwischen aufeinander folgenden R-Zacken,  $RR_{\text{intp}}$ ) und Atmung während der Rezitation von Hexameter-Versen. Deutlich sind in der Atemkurve zwei unterschiedliche Frequenzen zu erkennen (12 pro Minute und 6 pro Minute), während die Herzfrequenz (bzw. die RR-Abstände) nur eine langsame Oszillation zeigt. (B) Herzschlag und Atmung in der Ruhephase vor der Rezitation. Die Atemkurve zeigt eine leicht variierende Frequenz (über 12 pro Minute), die Herzfrequenz eine Oszillation von ca. 6 pro Minute. (C) Nach Tiefpassfilterung der Zeitreihen ist die Synchronisation von Herzschlag und Atmung während der Rezitation offensichtlich. (D) In der Ruhephase vor der Rezitation zeigt sich nach der Filterung, dass Herzschlag und Atmung nicht synchronisiert sind.



**Abb. 2:** Box und Whisker-Plots für die  $g$ -Werte zur Quantifizierung der cardiorespiratorischen Synchronisation. (A)-(C) Vergleich der drei Messungen für jede Übung (S1: Vorruhe, S2: Nachruhe). (D) Vergleich der drei Übungen (Hexameter-Rezitation, Kontrollatmung, Spontanatmung). Je niedriger der Wert von  $p_{\text{Friedman}}$  in den Diagrammen ist, desto wahrscheinlicher sind Unterschiede zwischen den drei Messungen. Über den Box und Whisker-Plots sind die Wahrscheinlichkeiten für gleiche Verteilungen der  $g$ -Werte in den unterschiedlichen Messungen angegeben. Die Box-Plots zeigen den Median, das untere bzw. obere Quartil (horizontale Linien der Box), den Mittelwert (Stern) und das Minimum bzw. Maximum an (Ausreißer sind als Kreuze markiert).

15 Minuten Sitzen → 20 Minuten Gehen + Übung → 15 Minuten Sitzen			
Sitzung 1	Vorruhe (S1)	<b>Hexameter Rezitation (H)</b>	Effektmessung (S2)
Sitzung 2	Vorruhe (S1)	<b>Kontrollierte Atmung (K)</b>	Effektmessung (S2)
Sitzung 3	Vorruhe (S1)	<b>Spontanatmung (S)</b>	Effektmessung (S2)

**Tab. 1:** Ablauf der Übungen: Jeder Proband musste drei unterschiedliche Übungen ausführen, pro Sitzung jeweils eine Übung. Jede Sitzung war in drei aufeinander folgende Messungen aufgeteilt: Vorruhe (S1) ohne Restriktionen auf die Art und Weise der Atmung, Übung (H, K oder S), und anschließend eine Effektmessung (S2) in der wiederum keinerlei Restriktionen bzgl. der Atmung bestanden. Weitere Details im Text.

	Herzfrequenz (1/Min)								
	S1			Übung			S2		
	25%	Median	75%	25%	Median	75%	25%	Median	75%
Hexameter $p_{\text{Friedman}}=0.000$	62.7	<b>71.1</b>	83.1	74.4	<b>82.9<sup>*,#</sup></b>	92.9	59.2	<b>67.5<sup>**</sup></b>	75.2
Kontr. Atm. $p_{\text{Friedman}}=0.000$	60.0	<b>66.1</b>	81.0	75.2	<b>81.0<sup>*</sup></b>	91.1	57.6	<b>62.7<sup>**</sup></b>	74.2
Spontanatm. $p_{\text{Friedman}}=0.000$	62.8	<b>72.3</b>	78.3	74.7	<b>78.8<sup>*</sup></b>	84.7	58.9	<b>66.8<sup>**</sup></b>	73.6
				$p_{\text{Friedman}}=0.086$					

\*  $p < 0.001$  vs. S1 and S2

\*\*  $p < 0.001$  vs. S1

#  $p < 0.05$  vs.

exercise S

**Tab. 2:** Median, unteres (25%) und oberes (75%) Quartil der medianen Herzfrequenz (in 1/Min) der Probanden während jeder Messung. Je niedriger der Wert von  $p_{\text{Friedman}}$ , desto wahrscheinlicher sind die Unterschiede zwischen den drei Messungen. Abkürzungen: siehe Tabelle 1.

	Frequenz der niederfrequenten Atmungszillationen (1/min)								
	S1			Übung			S2		
	25%	Median	75%	25%	Median	75%	25%	Median	75%
Hexameter $p_{\text{Friedman}}=0.000$	7.7	<b>8.3</b>	9.5	6.2	<b>6.4<sup>*,##,###</sup></b>	6.5	7.5	<b>8.5</b>	9.9
Kontr. Atm $p_{\text{Friedman}}=0.000$	7.2	<b>8.5</b>	8.8	6.4	<b>6.5<sup>*,#</sup></b>	6.6	7.5	<b>7.8</b>	8.7
Spontanatm. $p_{\text{Friedman}}=0.002$	7.5	<b>8.6</b>	9.9	8.3	<b>12.5<sup>**</sup></b>	20.0	7.5	<b>8.3</b>	10.7
				$p_{\text{Friedman}}=0.000$					

\*  $p < 0.001$  vs. S1 and S2  
exercise C

\*\*  $p < 0.01$  vs. S1 and S2

#  $p < 0.001$  vs.

##  $p < 0.001$  vs. exercise S

**Tab. 3:** Median, unteres (25%) und oberes (75%) Quartil der medianen niederfrequenten Atmungszillation (in 1/Min) der Probanden während jeder Messung. Je niedriger der Wert von  $p_{\text{Friedman}}$ , desto wahrscheinlicher sind die Unterschiede zwischen den drei Messungen. Abkürzungen: siehe Tabelle 1.