

Magnetische Wechselfelder und Herzratenvariabilität

Thomas Ehmann, Gerhard Lingg und Harald Lothaller

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund:

Unser Herz schlägt nicht absolut gleichmäßig, sondern die Zeitdauer zwischen den einzelnen Schlägen variiert. Mit diesen Herzrhythmuschwankungen kann das autonome Nervensystem (ANS) untersucht werden. Wenn die HRV-Regulation nicht optimal arbeiten können Stressfaktoren, die uns belasten, nicht mehr richtig ausgeglichen werden. Die HRV kann man auch als die Regulationsreserve bezeichnen, die wir brauchen, um innerem und äußerem Stress wirkungsvoll zu begegnen.

Forschungsfrage

Wird durch niederfrequente (50 Hz) magnetische Wechselfelder das Vegetativum eines Menschen (gemessen über die HRV) beeinflusst?

Methode:

Es handelt sich um eine Untersuchung am Menschen mit Ganzkörper-Exposition. Die Personen wurden einem intermittierenden niederfrequenten magnetischen Wechselfeld (50 Hz) ausgesetzt. Während der Experimente wurden die Expositionsbedingungen der magnetischen Wechselfelder mit einem Niederfrequenz-Analyser (Gigahertz-Solutions (NFA-1000) kontrolliert und aufgezeichnet. Gleichzeitig wurde für die autonome EKG-Aufzeichnung und anschließenden HRV-Auswertung der Neurocor ANS Recorder Flex BT eingesetzt. Die Studie wurde einfachblind durchgeführt. Die Probanden wussten nicht, zu welchen Zeiten sie den magnetischen Feldern ausgesetzt waren. Das heißt, es wurde nicht mit Doppelverblindung gearbeitet, da sowohl die magnetischen Felder als auch die HRV-Messwerte von den jeweiligen Messgeräten objektiv erhoben wurden. Die magnetische Flussdichte, die für den Versuch verwendet wurde, beträgt 650 nT. Das entspricht dem Mittelwert unter einer 10 Meter hohen 110 kV-Hochspannungsleitung. Die Werte einer Hochspannungsleitung können stark schwanken, da sie lastabhängig sind. Es wurde mit einem intermittierenden Feld von 5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 30 Min. aus gearbeitet. Es nahmen 22 Probanden der Studie teil.

Aufgrund interindividueller Unterschiede in den Ausgangswerten erfolgte die Auswertung in drei Schritten: 1. Mit absoluten Werten, 2. mit absoluter Abweichung (Messzeitpunkt – Ausgangswert), 3. zusätzlich mit relativer Abweichung (Messzeitpunkt / Ausgangswert).

Ergebnis

Bei keinem der untersuchten HRV-Parameter (SDRR, TP, LF, HF, LF/HF, RMSSD) zeigte sich eine Korrelation während oder nach den jeweiligen Expositionszeiten.

Bei den statistischen Auswertungen sowohl für absolute als auch relative Abweichungen wurde bei keinem der untersuchten HRV-Parameter signifikante Unterschiede zwischen den ausgewerteten Zeitintervallen festgestellt. Beispielfür alle weiteren Parameter sind nachfolgend die Werte für SDRR aufgelistet.

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – SDRR [ms]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_SDRR	45,19	17,50	-	-	-	
t2_SDRR	49,17	18,63	3,98	12,01	1,11	0,25
t3_SDRR	54,69	26,07	9,49	16,47	1,22	0,30
t4_SDRR	50,88	15,55	5,69	11,14	1,18	0,26
t5_SDRR	49,34	13,77	4,15	13,71	1,16	0,29
Sig. (Pillai)	0,081		0,333		0,249	
Prüfwert F	$F_{4;18} = 2,481$		$F_{3;19} = 1,209$		$F_{3;19} = 1,491$	

Tabelle 1: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – SDRR [ms]

Schlussfolgerung

Das untersuchte intermittierende magnetische Wechselfeld (ohne gleichzeitiges elektrisches Wechselfeld) mit einer Flussdicht von im Mittel 650 nT hat keinen Einfluss auf die HRV und das autonome Nervensystem eines Menschen.

Stichworte

HRV, Herzratenvariabilität, magnetische Felder, Magnetfelder, SDRR, EMF

EINLEITUNG

Erste Studien zur Herzratenvariabilität (HRV) sind in der 1960er Jahren veröffentlicht worden. Erste diagnostische Möglichkeiten der HRV wurden beschrieben. Seither haben die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema HRV stetig zugenommen. Seit den 1980er Jahren wächst die Anzahl an Studien fast exponentiell an. Am 12.12.2001 waren es 492 und am 22.03.2014 bereits 16.770 in PubMed veröffentlichte Studien (Suchbegriff: heart rate variability).

In der Medizin ist die Messung der HRV inzwischen als Diagnosemethode eingeführt. Die HRV-Messung ist ein nicht invasives Verfahren, das in der Sportmedizin sowie beim Ausdauersport als auch für in der Diagnose diabetischer und neuropathischer Vorgänge Verwendung findet. Auch psychologische Faktoren (z.B. Depressionen), die die HRV beeinflussen können oder von einer ungenügenden HRV-Regulationsfähigkeit ausgelöst werden können, sind immer mehr Bestandteil der Forschung.

Das Herz schlägt nicht absolut gleichmäßig, sondern die Zeitdauer zwischen den einzelnen Schlägen variiert. Mit diesen Herzrhythmuschwankungen kann das vegetative bzw. autonome Nervensystem (ANS) untersucht und analysiert werden. Der Mittelwert der Herzfrequenz ist hierzu jedoch nicht aussagekräftig, sondern die Variationsbreite (die Abweichung vom Mittelwert) der Herzschläge zeigt an, ob der Mensch äußeren Stressreaktionen ausgesetzt oder in Ruhe ist. Die Varianz der Phasenlänge, d.h. die Standardabweichung wird aus den gemessenen Abweichungen vom Mittelwert berechnet. Die HRV resultiert aus dem Zusammenwirken von Sympathikus und Parasympathikus. Der Parasympathikus reduziert die Herzfrequenz während der Sympathikus die Herzfrequenz erhöht [Mück et al. 2013].

Eine hohe HRV zeigt eine gute Anpassungsfähigkeit des Organismus an innere und äußere Faktoren der Umwelt. Bei einer reduzierten HRV, kann sich der Organismus nicht optimal an Umgebungsbedingungen anpassen und Krankheitserscheinungen können die Folge sein. Vielerlei Erkrankungen wie Krebs, Neuropathien, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und psychische Krankheiten werden einer verminderten HRV-Regulation zugeschrieben [Kucera 2008].

Wenn die HRV-Regulation nicht optimal arbeitet können Stressfaktoren, die uns belasten, nicht mehr richtig ausgeglichen werden. Die HRV könnte man auch als die Regulationsreserve bezeichnen, die wir haben bzw. brauchen, um innerem und äußerem Stress wirkungsvoll zu begegnen. Wenn sich die HRV diesen Stressoren nicht mehr anpassen, bzw. ihnen entgegenwirken kann, dann wird der Organismus mit der Zeit überbeansprucht, was zu Burn-Out-Syndromen, Depressionen, Psychosen, allergischen Reaktionen und je nach individueller Veranlagung zu vielen weiteren x-beliebigen Krankheitsbildern führen kann.

Die HRV ist sehr individuell auf den einzelnen Menschen bezogen und steht mit vielen Parametern in Verbindung, wie z.B. dem Geschlecht, dem Alter, dem Fitnesszustand, dem aktuellen Stresslevel, biologischen, chemische und physikalischen Umweltbelastungen. Auch Medikamente, Alkohol, Rauchen, akute und chronische Erkrankungen, Schlafstörungen, Überarbeitung etc. wirken sich auf die Regulationsreserven des HRV-Mechanismus aus [Curic et al. 2008]

HRV – Studien zu magnetischen Feldern (Niederfrequenz-NF)

Wenn man im EMF-Portal (www.emf-portal.de) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen nach den Stichworten heart rate variability, Herzfrequenz Variabilität, Herzfrequenzvariabilität in Bezug zu magnetischen Feldern sucht, findet man insgesamt 23 Studien (Stand 22.03.2014) aus den Jahren 1999 bis 2014, die sich mit diesen o.g. Themen beschäftigen.

Etliche dieser Studien fanden keinen Zusammenhang zwischen HRV und magnetischen Feldern (50/60 Hz). Sowohl bei Personen, die sich selbst als elektrosensibel bezeichnen, als auch bei den Kontrollgruppen wurde kein Ursache-Wirkungs-Prinzip festgestellt. Es wurden keine physiologischen als auch subjektiven Parameter mit der Exposition in Verbindung gebracht. Es wurde zum Teil mit sehr hohen Expositionen gearbeitet, die bis um das 12,5 über dem gesetzlichen Grenzwert (Deutschland) lagen.

Nachfolgend werden sechs Studien aufgeführt, die einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten magnetischen Feldern und der HRV gefunden haben bzw. bei denen ein Zusammenhang nahe gelegt werden kann.

[Köteles et al. 2012] haben elektrosensible Personen und eine nicht-elektrosensible Kontrollgruppe untersucht. Die Personen waren zufallsgesteuert 10 x 1 Minute Exposition von 500 μT ausgesetzt. (Anmerkung: Das ist das 5-fache des in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwertes). Bis zu einem gewissen Maß waren die elektrosensiblen Personen in der Lage das Feld wahrzunehmen. Wobei die beschriebenen subjektiven Symptome von den Autoren eher auf psychologische Effekte (Stress auf Grund der Angst vor dem Feld) als auf Auswirkungen des magnetischen Feldes zurückführen.

[Lednev et al. 2008] haben in ihrer Literaturstudie festgestellt, dass der Stresslevel einer Person unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes sowohl zu- als auch abnehmen kann.

[Baldi et al. 2007] haben Versuche mit Teilkörperexposition bei gepulsten magnetischen Feldern (5 bis 10 min aus – 20 min an – 20 min aus – 20 min an – 5 bis 15 min aus) bei einer Leistungsflussdichte von $4,21 \mu\text{T}$ gearbeitet. Sie haben bei allen Testpersonen eine Abweichung der Herzfrequenz festgestellt. Es wurde das LF zu HF Verhältnis der HRV (sympatho-vagale Gleichgewicht) untersucht. Die Reaktionen traten an den Flanken des Ein- und Ausschaltens der Exposition auf. Bei einer Pulsung von 3 bis 4 Hz des magnetischen Feldes traten die stärksten Effekte auf.

[Tabor et al.2004] fanden einen bei einer kontinuierlichen Magnetfeldexposition keinen Zusammenhang zwischen HRV und Magnetfeld (50 Hz, 20 bis 500 μT). Wie bei [Baldi et al. 2007] stellte sich jedoch eine Reaktion bei intermittierender Exposition (30 min aus, 30 min ein) ein. Es war ein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar. Der Parameter SDRR stieg um 40 % und der pNN50-Wert um 110 %.

[Graham et al. 2000] führten die Exposition mit magnetischen Feldern während des Schlafes durch. Sie verwendeten eine magnetische Flussdichte von $28,3 \mu\text{T}$ bei 60 Hz. Die Exposition dauert eine Stunde. die Exposition wurde in 15 Sekunden Intervallen an- und ausgeschaltet. Während des Schlafes wurde die HRV aufgezeichnet. Bei den männlichen Versuchspersonen zeigte sich keine Reaktion. Die Frauen jedoch schliefen kürzer und hatten kürzere REM-Schlaf-Phasen als ohne Exposition.

[Sait et al. 1999] arbeiteten mit kontinuierlichen und intermittierenden magnetischen Feldern bei einer Flussdichte von $20 \mu\text{T}$. Bei der kontinuierlichen Feldbelastung (Sinus) war ein kleiner aber signifikanter Rückgang der Herzfrequenz feststellbar. Bei einer Exposition in 15 Sekunden-Intervallen wurden inkonsistente Reaktionen der Herzfrequenz gemessen. Bei der kontinuierlichen Exposition war eine Reduzierung des LF zu HF – Verhältnisses erkennbar. Bei intermittierender Exposition war diese Verminderung signifikant. Der LF-Parameter (ms^2) der HRV (Sympathikus) sprach sowohl bei kontinuierlicher als auch bei intermittierender Exposition an. Der HRV-HF-Parameter (Parasympathikus in ms^2) zeigte bei beiden Expositionsbedingungen signifikante Reaktionen. Die Autoren schlussfolgern, dass kurze Expositionen HRV-Werte an einem Arbeitsplatz beeinflussen können.

Messung der HRV und die Analyse-Parameter

Für die HRV-Analyse benötigt man ein genaues EKG-Messgerät mit einer hohen Abtastrate, das gut ausgeprägten R-Zacken erfasst. Die erforderliche Abtastrate ergibt sich aus dem Theorem von Shannon, das besagt, dass die Abtastrate mindestens doppelt so hoch sein muss, wie die höchste im zu untersuchenden Signal vorkommende Frequenz. Eine Abtast-rate von 1.000 Hz wie von der österreichischen Gesellschaft für Holter-Medizin vorgeschlagen [Eller-Berndl 2010] ist demnach nicht erforderlich und produziert nur eine Unmenge von zusätzlichen Daten. Das verwendete Neurocor-Messgerät arbeitet mit einer Abtastfrequenz von 500 Hz, was sich in der Praxis bewährt hat [Wittling 2012]. Die R-Zacken benötigt man als Triggerpunkte, um die Länge zwischen zwei Herzschlägen exakt bestimmen zu können. Alle RR-Zeiten, die über die Messdauer erfasst wurden, ergeben eine große Menge an Daten, die nach der Messung von der HRV-Software (statistisch) ausgewertet werden. Um eine aussagekräftige und verlässliche statistische Aussage benötigt man ein gewisses Minimum an Daten [Eller-Berndl 2010].

Die verwendete Analyse-Software der Fa. Neurocor benötigt eine Datenaufzeichnungsdauer von mindestens 5 Minuten und 35 Sekunden, um valide Aussagen zur HRV zu bekommen.

Die Analyse der HRV wird zeit- und frequenzbezogen durchgeführt.

Die RR-Zeiten werden in Abhängigkeit der Zeit erfasst. Die RR-Schwankungen können als eine Funktion der Zeit dargestellt werden. Mit einer Fast Fourier Transformation (FFT) können die RR-Schwankungen als eine Funktion der Frequenz dargestellt werden. Die Schwankungen werden hierbei in Einzelfrequenzen bzw. Frequenzbänder zerlegt. Dabei erkennt man, dass die HRV sowohl hoch- als auch niederfrequenten Schwankungen unterliegt.

Die hochfrequenten Schwankungen (high frequency, HF-Oszillationen $> 0,15 \text{ Hz} < 0,5 \text{ Hz}$) der Herzschlaggeschwindigkeit sind ein Maß für die parasympathische Aktivierung des Herzschlags. Die niederfrequenten Schwankungen (low frequency, LF-Oszillationen $< 0,15 \text{ Hz}$) sind ein Maß für sympathische Aktivierungsprozesse [Wittling 2012].

Zeitbezogene Analysen

Arithmetischer Mittelwert der RR-Intervalle in Millisekunden (ms) - RR [ms].

Arithmetischer Mittelwert der RR-Intervalle in bpm (Schläge pro Minute) - RR [bpm].

Die Standardabweichung der RR-Zeiten wird als SDRR [ms] bezeichnet. Sie ist ein Maß für die Gesamtvariabilität der Herzrate. Je höher der SDRR-Wert ist, desto höher ist die autonome Aktivität. Es werden auch die hochfrequenten RR-Variationen erfasst und mit RMSSD [ms] angegeben. RMSSD wird aus der Quadratwurzel der Summe der RR-Differenzen berechnet. Die Höhe von RMSSD ist ein stabiles Maß für parasympathische Aktivität.

Frequenzbezogene Analysen

Die Variabilität der Herzschläge wird in Frequenzen bzw. Frequenzbänder aufgeteilt. Die Variationsstärke des Herzschlags wird als Maß der Spektralpower (in ms^2) erfasst.

HF ms^2 - High Frequency Power [ms^2] ist das Maß des parasympathischen Aktivierungsniveaus (0,15 – 0,4 Hz). HF-Power korreliert mit RMSSD [ms] der zeitbezogenen Analyse.

LF ms^2 - Low Frequency Power [ms^2] ist in überwiegendem Maß die sympathische Aktivierung des Herzschlags (0,04 – 0,15 Hz). Die Höhe von LF-Power ist ein Maß der Sympathikus-Aktivität. Es jedoch kein ausschließliches Maß sympathischer Aktivierung, da auch andere (parasympathische) Einflüsse einwirken.

TP ms^2 - Total Power [ms^2] (0,003 – 0,4 Hz) ist die Gesamtleistung der Frequenzbänder HF ms^2 und LF ms^2 . Wie die korrelierende SDRR [ms] spiegelt die Total Power die gesamte autonom-nervöse Regulationsfähigkeit wieder.

High Frequency (HFnu) und Low Frequency (LFnu) sind normalisierte Powerwerte, bei denen die Abhängigkeit von TP- und VLF-Power herausgerechnet wurde. Es ist keine Abhängigkeit zu TP- und VLF-Power mehr gegeben.

Mit dem Verhältnis LF [ms^2]/HF [ms^2] werden diese beiden Frequenzanteile gewichtet, um den Grad der Ausprägung zwischen sympathischer und parasympathischer Aktivierung darzustellen.

Bei Werten > 1 liegt eine ausgeprägte Dominanz des sympathischen Systems vor.

Das LF/HF-Verhältnis ist umstritten, da es nicht immer aussagekräftig ist [Eller-Berndl 2010].

Das LF zu HF-Verhältnis (LF/HF) korreliert nicht mit den anderen o. g. Parametern.

Fragestellung der Studie

Wird durch niederfrequente (50 Hz) magnetische Wechselfelder das Vegetativum - gemessen über die Herzratenvariabilität (HRV) - beeinflusst?

Arbeitshypothese zu Projektbeginn

Die Arbeitshypothese nimmt an, dass durch eine Ganzkörper-Exposition durch niederfrequente magnetische Wechselfelder Effekte beim Menschen ausgelöst werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Herzratenvariabilität auf die Exposition reagiert, das heißt, dass die Regulation des autonomen Nervensystems beeinflusst wird und die Stressregulationsreserven dadurch abnehmen werden.

MATERIAL UND METHODEN

Untersuchungsprinzip

Es handelt sich um eine Untersuchung am Menschen mit Ganzkörper-Exposition. Die Personen werden einem niederfrequenten magnetischen Wechselfeld (50 Hz) ausgesetzt.

Die benutzte Feldquelle ist ein Stahldraht, der in ca. 1,5 Meter Höhe über dem Kopf der Versuchsperson verläuft. Durch diese Leitung wird ein Wechselstrom geleitet. Dieser Strom wird mit einer Wechselspannung von 15 Volt erzeugt. Die Leitungsanordnung hat einen Widerstand von 1,5 Ohm, woraus sich ein Stromfluss von 10 Ampere ergibt.

Objektiver Endpunkt: Vegetative Regulation erfasst durch die HRV.

Kontrolle der Umgebungsfelder mittels Niederfrequenz-Analyser (NFA-1000 – Gigahertz-Solutions). Es können Frequenzen die Frequenzen von 1 Hz bis 1 MHz selektiv gemessen und aufgezeichnet werden.

Während der Experimente werden gleichzeitig die Expositionsbedingungen der magnetischen Wechselfelder mit einem Niederfrequenz-Analyser kontrolliert und aufgezeichnet. Zur EKG Ableitung für die autonome EKG-Aufzeichnung und anschließenden HRV-Auswertung wird der Neurocor ANS Recorder Flex BT eingesetzt. Mit der Software Neurocor ANS-Tracer werden die EKG-Daten aufgezeichnet. Die Software Neurocor ANS-Explorer wertet die aufgezeichneten EKG-Rohdaten aus und erstellt eine HRV-Analyse. Die Software verfügt über eine automatische Artefaktkorrektur.

Wenn das aufgezeichnete EKG-Signal mit mehr als 2% Artefakten belastet ist, wird dieser Versuch verworfen, und die Daten werden nicht für die Studie herangezogen.

Die Studie wurde einfachblind durchgeführt. Die Probanden wussten nicht, zu welchen Zeiten sie den magnetischen Feldern ausgesetzt waren. Es wurde nicht mit Doppelverblindung gearbeitet. Sowohl die magnetischen Felder als auch die HRV-Messwerte wurden von den jeweiligen Messgeräten objektiv erhoben. Die Erfassung des EKGs erfolgte vor, während und nach der Exposition.

Die HRV-Auswertung wurde nach der Messung vorgenommen, da eine Mindestanzahl an Daten bzw. Messzeit notwendig ist, um statistisch valide Daten errechnen zu können. Die Minimumvorgabe des Neurocor-Messsystems ist 5 Minuten und 35 Sekunden Messzeit.

Um die Datenmenge handhabbar zu halten, wurden im 15 Minuten-HRV-Intervalle berechnet, um so im 15-Minutenabstand verwertbare HRV-Ergebnisse zu erzielen (siehe Abbildung 1).

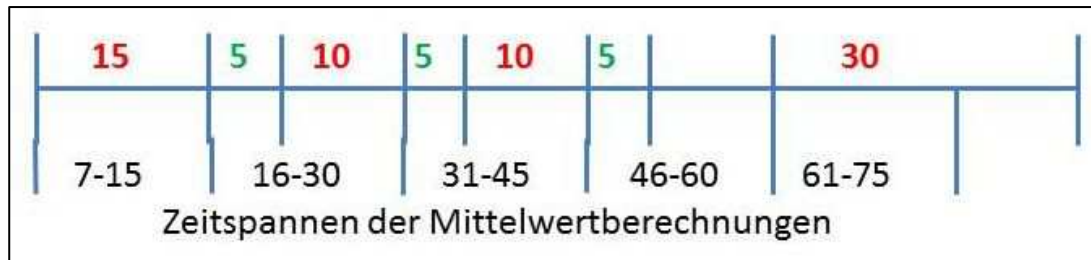


Abbildung 1: HRV-Auswertungszeiten

Für diese Auswertung werden nur fünf Zeitintervalle für die Auswertung betrachtet.

Die Minuten 1-5 werden nicht bewertet, der Anfangsstress soll sich legen.

1. Zeitintervall: Minute 6-20 (15 Minuten ohne Exposition).
2. Zeitintervall: Minute 21-35 (5 Min. Exposition, 10 Min. keine Exposition).
3. Zeitintervall: Minute 36-50 (5 Min. Exposition, 10 Min. keine Exposition).
4. Zeitintervall: Minute 51-65 (5 Min. Exposition, 10 Min. keine Exposition).
5. Zeitintervall: Minute 66-80 (15 Minuten ohne Exposition)

Die Minuten 81-85 werden nicht mehr bewertet, der Endstress soll sich nicht auf die Auswertung auswirken.

Folgende Parameter werden erfasst und statistisch ausgewertet:

Zeitbezogene Werte:

- SDRR [ms], RMSSD [ms]

Frequenzbezogene Werte:

- TP [ms²], HF [ms²], LF [ms²], LF zu HF

Zur Lenkung der Aufmerksamkeit und um stressende Umweltfaktoren möglichst gering zu halten, werden den Probanden während der Exposition Landschafts- und Naturbilder angeboten. Es wird eine automatisch ablaufende Powerpoint-Präsentation mit 500 Bildern auf Flachbildschirm mit einem Bildwechsel von 11 Sekunden verwendet.

Aufgrund dieser interindividuellen Unterschiede in den Ausgangswerten erfolgt die Auswertung in zwei weiteren Schritten auf der Basis von Abweichungswerten vom Ausgangswert, d.h. es wird zur Berechnung noch die absolute und die relative Abweichung des jeweiligen Messzeitpunkts vom Ausgangswert herangezogen.

Die Ergebnisse werden demzufolge auf drei Arten überprüft:

1. Mit absoluten Werten
2. Mit absoluter Abweichung (Messzeitpunkt – Ausgangswert)
3. Zusätzlich mit relativer Abweichung (Messzeitpunkt / Ausgangswert).

TeilnehmerInnen

Es werden gesunde erwachsene Teilnehmer (Alter 16 bis 70 Jahre) zu rekrutiert. Die Teilnehmer stimmen schriftlich zu, dass ihre Daten anonymisiert und elektronisch gespeichert und für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden.

Kinder, Jugendliche unter 16 und nicht einwilligungsfähige Personen sind von der Teilnahme ausgeschlossen. Die potentiellen Teilnehmer werden durch öffentlichen Aushang, Inserate, Mundpropaganda, etc. über die Studie informiert und zur Teilnahme eingeladen.

Magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte, die für den Versuch verwendet wird, schwankt zwischen 620 und 720 nT. Das entspricht dem Mittelwert (650 nT) unter einer 10 Meter hohen 110 kV-Hochspannungsleitung.

Aufgrund der o. g. Studienergebnisse wird für den Versuch eine intermittierende Exposition gewählt. Bei einer intermittierenden Expositionsart haben sich in früheren Untersuchungen, die signifikantesten Effekte gezeigt [Baldi et al. 2007], [Graham et al. 2000], [Sait et al. 1999], [Tabor et al. 2004].

Je nach Lastverteilung und tageszeitlich variierendem Stromfluss kann ein intermittierendes Verhalten auch bei einer Hochspannungsleitung auftreten.

Die gewählten Expositionsbedingungen sind:

- 20 Minuten ohne Exposition zur Vorentspannung
- 5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 10 Min. aus
- 20 Minuten ohne Exposition – Abklingphase

Protokollierung

Die Teilnehmer füllen vor Beginn des Versuches einen Fragebogen aus (siehe Anhang A).

Die Versuche und die eingestellten Expositionsbedingungen werden mit den durchnummerierten Versuchsprotokollen (siehe Anhang B) dokumentiert.

Als objektive automatische Expositions-Kontrolle dienen die Aufzeichnungen des NF-Analysators. Die reale Exposition - gesteuert durch die Zeitschaltuhr wird parallel zu den HRV Messungen erfasst, und wird mit den HRV Messungen abgeglichen.

Mentaler Stress

Stress jeder Art beeinflusst die HRV Aktivität. Erhöhtes subjektives Stresserleben vermindert die Reaktionsfähigkeit der HRV -Ableitung. Das subjektive Stresserleben wird aufgrund der HRV Aufzeichnungen während der nicht EMF exponierten Zeit dokumentiert. Um mögliche HRV-Schwankungen durch erhöhte stressbedingte Einflüsse anzuzeigen werden die HRV Ableitungen der Teilnehmer bereits 20 Minuten vor Expositionsbeginn dokumentiert. Um in dieser Zeit das Stresserleben der Probanden auf ein möglichst ausgeglichenes Niveau zu bringen, werden Bilder Natur- und Landschaftsbilder auf einem Monitor angezeigt.

ERGEBNIS

Grafische Auswertung: Die Mittelwertbetrachtung der einzelnen HRV-Parameters aller Versuchspersonen über die einzelnen Zeitintervalle hinweg zeigte bei keinem der HRV-Parameter einen Zusammenhang zwischen EMF-Expositionen und HRV-Werten. Nachfolgend sind exemplarisch die Mittelwerte des HRV-Parameters SDRR, der die Regulationsfähigkeit des ANS repräsentiert, dargestellt. Die Balken stellen die Expositionszeiten dar (siehe Abbildung 2).

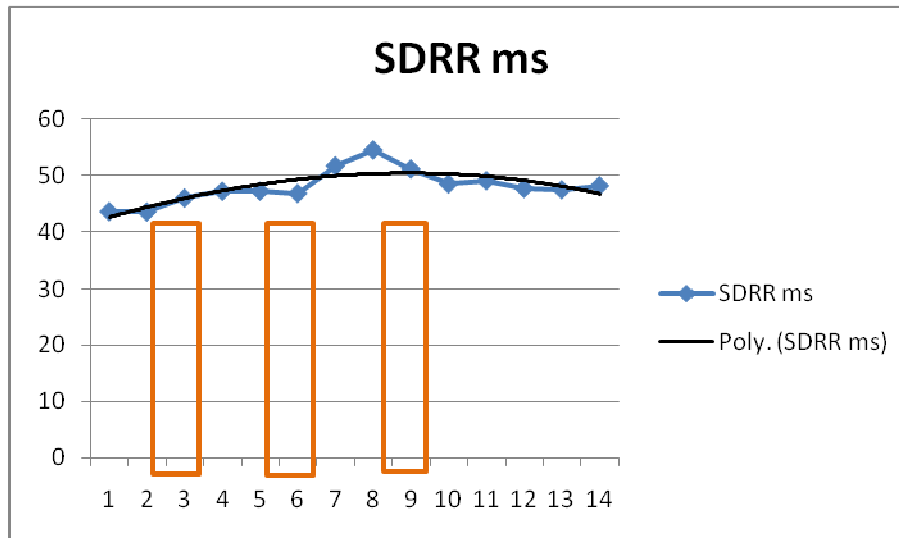


Abbildung 2: SDRR Mittelwerte aller VP's

Die *statistische Auswertung* mit den HRV-Absolutwerten zeigte, dass sich die Versuchspersonen untereinander stark unterscheiden können, d.h. die Streuung innerhalb der Messungen zwischen den Personen hoch sein kann.

Die Tatsache, dass sich die Versuchspersonen untereinander sehr stark unterscheiden, ändert sich auch bei der Berechnung der Abweichungswerte nicht, v.a. nicht mit den absoluten – hier sind die Streuungen in der Regel viel höher als die Mittelwerte selbst, aber auch bei den relativen Abweichungswerten sind die Streuungen immens. Die HRV-Parameter der Personen verändern sich unsystematisch, so dass keine Korrelation zwischen HRV und Exposition erkennbar ist. Bei den statistischen Auswertungen sowohl für absolute als auch relative Abweichungen wurde keine signifikanten Unterschiede zwischen den 14 Intervallen festgestellt. Bei keinem der untersuchten HRV-Parameter war eine signifikante Änderung über die einzelnen Zeitintervalle erkennbar.

Wegen der Datenfülle wird im Weiteren auf die Methoden der deskriptiven Statistik in Form von Tabellen zurückgegriffen. Es kommt nachfolgend das allgemeine lineare Modell zur Anwendung. Die Annahme ist, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen HRV-Parametern und den Expositionszeiten besteht.

Im nachfolgenden werden die Daten von einer Stichprobe von $N = 22$ Versuchspersonen ausgewertet. Es werden der Mittelwert der einzelnen berechneten Zeitintervalle ($t_1 - t_5$) sowie die Streuung der Stichprobe - die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung zeigt die Streubreite der HRV-Parameter zu den jeweiligen Zeiten deren Mittelwert.

Die Standardabweichung ist die durchschnittliche Entfernung aller Messwerte vom Durchschnitt.

Ein Fall der Varianzanalyse ist der statistische F-Test. Mit diesem Test (Prüfwert F) kann mit einer gewissen Konfidenz entschieden werden, ob die zu den unterschiedlichen Zeiten aufgezeichneten HRV-Parameter sich hinsichtlich ihrer Varianz wesentlich unterscheiden.

Der Freiheitsgrad (degrees of freedom, df oder f) entspricht dem Stichprobenumfang n minus der Anzahl Parameter p die aus diesem Stichprobenumfang geschätzt wurden: $df = f = n - p$

Die Signifikanz ist das „Ergebnis“ der Prüfung des aus den Daten ermittelten F-Wertes gegen den kritischen F-Wert aus der Verteilung unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade. Die statistische Signifikanz (p-Wert) sagt aus, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Ergebnis dem Zufall entspringt. $p < 0.05$ bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit kleiner als 5% ist. Das Ergebnis ist statistisch signifikant.

Die F-Prüfwerte bezogen auf die Freiheitsgrade (tiefergestellte Ziffern) und die entsprechende Signifikanz (Pillai-Spur) stellen sich wie folgt dar:

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – SDRR [ms]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_SDRR	45,19	17,50	-	-	-	
t2_SDRR	49,17	18,63	3,98	12,01	1,11	0,25
t3_SDRR	54,69	26,07	9,49	16,47	1,22	0,30
t4_SDRR	50,88	15,55	5,69	11,14	1,18	0,26
t5_SDRR	49,34	13,77	4,15	13,71	1,16	0,29
Sig. (Pillai)	0,081		0,333		0,249	
Prüfwert F	$F_{4;18} = 2,481$		$F_{3;19} = 1,209$		$F_{3;19} = 1,491$	

Tabelle 1: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – SDRR [ms]

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – RMSSD [ms]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_RMSSD	29,73	14,12	-	-	-	-
t2_RMSSD	32,52	16,06	2,8	5,19	1,10	0,14
t3_RMSSD	32,22	15,95	2,5	5,45	1,10	0,20
t4_RMSSD	32,14	14,23	2,41	6,45	1,12	0,32
t5_RMSSD	30,55	11,48	0,82	6,06	1,09	0,27
Sig. (Pillai)	0,201		0,468		0,799	
Prüfwert F	$F_{4;18} = 1,669$		$F_{3;19} = 0,883$		$F_{3;19} = 0,337$	

Tabelle 2: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – RMSSD [ms]

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – Total Power [ms ²]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_TP[ms ²]	1228,60	816,06	-	-	-	-
t2_TP[ms ²]	1767,72	1585,60	539,11	1203,92	1,47	1,10
t3_TP[ms ²]	1930,93	1790,72	702,32	1429,65	1,56	0,84
t4_TP[ms ²]	1702,74	1199,11	474,13	1044,52	1,55	0,82
t5_TP[ms ²]	1628,43	940,61	399,83	879,73	1,60	0,98
Sig. (Pillai)	0,119		0,839		0,969	
Prüfwert F	F _{4;18} = 2,133		F _{3;19} = 0,280		F _{3;19} = 0,082	

Tabelle 3: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – Total Power [ms²]

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – LF [ms ²]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_LF [ms ²]	374,07	262,92	-	-	-	-
t2_LF [ms ²]	699,04	916,64	324,97	836,36	1,91	2,58
t3_LF [ms ²]	527,75	523,99	153,68	445,45	1,47	1,28
t4_LF [ms ²]	592,01	695,17	217,94	657,07	1,71	1,90
t5_LF [ms ²]	457,99	350,20	83,92	291,97	1,49	1,09
Sig. (Pillai)	0,470		0,437		0,353	
Prüfwert F	F _{4;18} = 0,926		F _{3;19} = 0,948		F _{3;19} = 1,154	

Tabelle 4: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – LF [ms²]

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – HF [ms ²]						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_HF [ms ²]	294,01	277,45	-	-	-	-
t2_HF [ms ²]	359,32	348,92	65,31	130,65	1,18	0,33
t3_HF [ms ²]	344,61	331,96	50,60	149,07	1,28	0,69
t4_HF [ms ²]	369,12	382,05	75,11	214,41	1,49	1,60
t5_HF [ms ²]	285,0	203,8	-9,01	130,27	1,30	1,03
Sig. (Pillai)	0,238		0,300		0,741	
Prüfwert F	F _{4;18} = 1,522		F _{3;19} = 1,312		F _{3;19} = 0,419	

Tabelle 5: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – HF [ms²]

Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – LF zu HF						
	Absolutwerte		Absolute Abweichung		Relative Abweichung	
	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA	Mittelwert	SA
t1_LFzuHF	2,16	1,88	-	-	-	-
t2_LFzuHF	2,62	2,53	0,46	1,58	1,51	1,50
t3_LFzuHF	2,28	1,98	0,12	1,19	1,28	0,95
t4_LFzuHF	2,7	3,0	0,54	2,23	1,48	1,40
t5_LFzuHF	2,14	1,74	-0,02	1,32	1,28	0,77
Sig. (Pillai)	0,414		0,301		0,545	
Prüfwert F	F _{4;18} = 1,040		F _{3;19} = 1,307		F _{3;19} = 0,733	

Tabelle 6: Allgemeines Lineares Modell: Deskriptive Statistik – LF zu HF

DISKUSSION

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von [Köteles et al. 2012], [Lednev et al. 2008], [Tabor et al. 2004], [Baldi et al. 2007], [Graham et al. 2000] und [Sait et al. 1999] konnte bei der in dieser Studie gewählten Versuchsanordnung, den Expositionszeiten und –Intervallen keine signifikante Reaktion der HRV festgestellt werden. Um die Ergebnisse weiter zu verifizieren, sollten ggf. in einer Vorstudie verschiedene Expositionszeiten und Intermittierungsintervalle auf HRV-Reaktionen hin genauer geprüft werden.

Auch verschieden hohe Feldstärken sollten in einer Vorstudie eingesetzt werden, um zu sehen in welchem Feldstärkebereich die HRV reagiert. Bei den o.g. Studien wurden zum Teil deutlich höhere Feldstärken verwendet.

Ein weiterer Grund, warum bei dem hier benutzten Versuchsaufbau keine Reaktion erfolgt ist, könnte auch auf ein Zusammenspiel von magnetischem und elektrischem Wechselfeld hindeuten. Bei der vorliegenden Studie wurde die magnetische Feldstärke mit 15 Volt Niederspannung und einem Strom von 10 Ampere erzeugt. Der Proband ist nur einem vernachlässigbaren elektrischen Wechselfeld von kleiner 10 V/m ausgesetzt. Wegen der unmittelbaren Nähe (ca. 1,5 m) zur Feldquelle ist der Proband aber trotzdem einer magnetischen Flussdichte ausgesetzt, die der unter einer Hochspannungsleitung in 6-10 Metern Höhe entspricht. (Die Flussdichte nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.)

Für den hier beschriebenen Versuch haben sich überwiegend (16) Frauen im Alter zwischen 35 und 54 Jahren gemeldet. Die Verteilung ist nachfolgend in Tabelle 1 dargestellt.

Altersgruppe	männlich	weiblich
18 - 34	2	0
35 - 54	2	16
55 - 80	0	2

Tabelle 7: Altersverteilung der Versuchspersonen

Für eine zukünftige Verifizierung der Ergebnisse sollte auch die Alters- und Geschlechterverteilung ausgewogener gewählt werden.

SCHLUSSFOLGERUNG

Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss magnetischer Wechselfelder (50 Hz) auf die HRV zu untersuchen. Der verwendete Expositionswert von 650 nT mit der gewählten Intermittierung (5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 10 Min. aus, 5 Min. an, 30 Min. aus) ergab keine Auswirkung auf die HRV bzw. die Regulation des ANS. Die Studien, die Effekte von magnetischen Wechselfeldern auf die HRV zeigten, arbeiteten zum Teil mit deutlich höheren magnetischen Flussdichten. In dieser Studie wurde, um ausschließlich das magnetische

Wechselfeld zu betrachten, das elektrische Wechselfeld mit 10 V/m vernachlässigbar klein ausgelegt. Um die Auswirkung einer realen Hochspannungsleitung auf die HRV zu bewerten, sollte der Versuch mit einem magnetischen und gleichzeitig mit einem elektrischen Wechselfeld mit einer Spannung, die typisch für eine Hochspannungsleitung ist, wiederholt werden. Eventuell zeigen sich Auswirkungen auf die HRV erst im Zusammenspiel bei einer gleichzeitigen Exposition mit einem hohen (unter einer 110 kV-Leitung noch bis zu 500 V/m) elektrischen Wechselfeld? Dies entspricht dann auch den Bedingungen, wie sie in der Realität bei einer Hochspannungsleitung, einer Trafostation o.ä. anzutreffen sind.

ABKÜRZUNGEN

ANS	=	autonomes Nervensystem
HRV	=	heart rate variability
HF	=	high frequency power, 0.151 – 0.4 Hz, in ms^2 , parameters used to measure parasympathetic activation
LF	=	low frequency power, 0.04 – 0.15 Hz, in ms^2 , parameters reflecting sympathetic activation (amongst other processes)
LF/HF	=	ratio or $LFms^2/HFms^2$ ratio = parameter of sympathetic-vagal balance
NF	=	Niederfrequenz
SDRR	=	standard deviation of all RR-intervals in ms, used as an overall measure of heart rate variability across all frequency ranges
TP	=	total power of RR-interval variability in the frequency range 0.003 – 0.4 Hz in ms^2 , used as a supplementary measure
VLF	=	very low frequency power VLF, 0.003 – 0.039 Hz

LITERATUR

Baldi E, Claudio, Lithgow, Brian J. A pilot investigation of the effect of extremely low frequency pulsed electromagnetic fields on humans' heart rate variability 2007; In: *Bioelectromagnetics* 28 (1), S. 64–68.

Curic A, Männer H, Meißner S, Morawetz F. Untersuchung zur Herzratenvariabilität unter Untersuchung zur Herzratenvariabilität unter Stress- und Entspannungs-Bedingung. Institut für experimentelle Psychologie. Regensburg 2008. Online verfügbar unter http://www-app.uni-regensburg.de/Fakultaeten/PPS/Psychologie/Lukesch/downloads/forschung/Berichte/pwp_ws_2007_herzratenvariabilitaet.pdf, zuletzt aktualisiert am 27.03.2008, zuletzt geprüft am 03.03.2013.

Eller-Berndl D. Herzratenvariabilität. 1. Aufl. Wien: Verl.-Haus der Ärzte 2010.
Graham C, Sastre A, Cook MR, Gerkovich MM. Nocturnal magnetic field exposure: gender-specific effects on heart rate variability and sleep 2000; In: *Clin Neurophysiol* 111 (11), S. 1936–1941.

Köteles F, Szemerszky R, Gubanyi M, Kormendi J, Szekrenyesi C, Lloyd R et al. Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) and electrosensitivity (ES) - Are they connected? 2012; In: *Int J Hyg Environ Health*.

Kucera M. Herzratenvariabilität 2008. Online verfügbar unter http://www.drkucera.eu/upload_doc/herzratenvariabilitat_einleitung_de_2006_ok.pdf, zuletzt aktualisiert am 12.04.2008, zuletzt geprüft am 01.03.2013.

Lednev VV, Belova NA, Ermakov AM, Akimov EB, Tonevitskii AG. Modulation of cardiac rhythms in humans exposed to extremely weak alternating magnetic fields. 2008; In: *Biofizika* 53 (6), S. 1129–1137.

Mück H, Löllgen D, Mück-Weymann M. Herzratenvariabilität 2013; Online verfügbar unter <http://www.hrv24.de/>, zuletzt aktualisiert am 06.05.2013, zuletzt geprüft am 20.05.2013.

Sait ML, Wood AW, Sadafi HA. A study of heart rate and heart rate variability in human subjects exposed to occupational levels of 50 Hz circularly polarised magnetic fields 1999; In: *Med Eng Phys* 21 (5), S. 361–369.

Tabor Z, Michalski J, Rokita E. Influence of 50 Hz magnetic field on human heart rate variability: linear and nonlinear analysis 2004; In: *Bioelectromagnetics* 25 (6), S. 474–480.

Wittling W. Herzschlagvariabilität: Frühwarnsystem, Stress- und Fitnessindikator. Heiligenstadt: Eichsfeld 2012.