

Aus dem Institut für Physiologie  
Zentrum für Weltraummedizin Berlin der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

## DISSERTATION

Langzeitisolation in der Antarktis - Veränderungen der nächtlichen  
Herzfrequenzvariabilität als Ausdruck einer angepassten Regulation  
des autonomen Nervensystems

Long term isolation in Antarctica - shifts in nocturnal heart rate  
variability indicating modulated regulation  
of the autonomic nervous system

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von  
Bernhard Andreas Gropp

Datum der Promotion: 23. März 2024



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	VII
Zusammenfassung .....	IX
Abstract .....	XI
1. Einleitung .....	1
1.1. Forschungsstandort Antarktis.....	4
1.2. Neumayer Station III .....	8
1.3. Physiologische Forschung in der Antarktis.....	13
1.4. Physiologische Grundlagen .....	16
1.4.1. Das autonome Nervensystem .....	16
1.4.2. Einflussfaktoren auf die kardiale Regulation durch das autonome Nervensystem ...	21
1.4.3. Herzfrequenzvariabilität.....	29
1.5. Fragestellung .....	37
2. Methoden .....	38
2.1. Überwinterungszyklus an der Neumayer Station III.....	38
2.2. Studienablauf.....	41
2.3. Datenaufbereitung .....	42
2.4. Auswertung.....	44

3. Ergebnisse .....	46
3.1. Anthropometrische Daten .....	47
3.2. Auswertung der Herzfrequenzbestimmung in den Nachtstunden (NN-Intervall) .....	48
3.3. Auswertung der nächtlichen SDNN .....	53
3.4. Auswertung des nächtlichen pNN50 .....	58
3.5. Auswertung des Wertes der nächtlichen rMSSD .....	63
3.6. Auswertung des nächtlichen Quotienten LF/HF .....	68
4. Diskussion .....	73
4.1. Beurteilung der Ergebnisse zur Fragestellung .....	73
4.2. Methoden .....	77
4.2.1. Studienaufbau .....	77
4.2.2. Aufgezeichnete und ausgewertete Faktoren der Zeitdomäne .....	79
4.2.3. Aufgezeichnete und ausgewertete Faktoren der Frequenzdomäne .....	80
4.2.4. Monatliche Auswertung und Auswertung nach Unterteilung in Tertiale .....	81
4.2.5. Einschränkungen .....	81
5. Ausblick .....	83
Literaturverzeichnis .....	85
Anhang .....	i
Eidesstattliche Versicherung .....	iii
Lebenslauf .....	v
Danksagung .....	viii
Bescheinigung zur Statistik .....	x

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung oder Definition
AWI	Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
ACTH	Adrenocorticotropes Hormon
BBC	British Broadcasting Corporation
COMNAP	Council of Managers of National Antarctic Programs - Rat der Leiter der nationalen Antarktisprogramme
CRH	Corticotropin-Releasing-Hormon
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EKG	Elektrokardiogramm
FS	Forschungsschiff
HF	High Frequency Power - Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,15 – 0,4 Hz
HFnu	Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,15 – 0,4 Hz normalisiert
HRV	Herzfrequenzvariabilität Englisch heart rate variability
I27DE	Infraschallmessstation 27 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization - Satellitenkommunikationsanbieter
IRIDIUM	Iridium Communications Inc. US-amerikanisches Unternehmen zu Satellitenkommunikation
KI	Konfidenzintervall
LF	Low Frequency Power Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,04 - 0,15 Hz
LF/HF	Quotient aus Anteil der Frequenzkomponenten im Bereich 0,04 – 0,15 Hz geteilt durch den Anteil von Frequenzkomponenten 0,15 – 0,40 Hz
LFnu	Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,04 - 0,15 Hz normalisiert
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NN-Intervall	Normal-Sinus – Normal-Sinus Intervall - Dauer einer elektrischen Herzaktion
NREM	non-rapid-eye-movement (Schlafphase)
pNN50	Percentage of differences between adjacent NN intervals that are greater than 50 milliseconds - Prozentsatz der NN-Intervalle mit mindestens 50 Millisekunden Abweichung vom vorausgehenden NN-Intervall
REM	rapid-eye-movement (Schlafphase)
rMSSD	Root Mean Square of Successive Differences - Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle
NN-Intervall	Dauer einer elektrischen Herzaktion
SDANN	Standard deviation of the averages of NN intervals in all 5-minute segments of a recording - Standardabweichung der NN-Intervalle in aufeinanderfolgenden 5-minütigen Kurzzeitintervallen
SDNN	Standard deviation of all NN intervals - Standardabweichung der Dauer des NN-Intervalls
SES-4	kommerzieller Kommunikationssatellit der SES World Skies niederl. Satellitenkommunikationsanbieter
SPOT	Single Penguin Observatory - Pinguinbeobachtungsobservatorium
T	Tertial
TP	Total Frequency Power - Leistungsdichte über den Frequenzbereich von 0 - 0,4 Hz
TSH	Thyreidea-Stimulierendes-Hormon
UTC	Coordinated Universal Time - koordinierte Weltzeit
ZWMB	Zentrum für Weltraummedizin Berlin Institut für Physiologie Charité Universitätsmedizin Berlin

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Karte der Antarktis .....	4
Abbildung 2 Auswahl an Forschungsstationen .....	7
Abbildung 3 Neumayer-Station III .....	9
Abbildung 4 Behandlungsraum .....	10
Abbildung 5 Eingriffsraum .....	10
Abbildung 6 Sonnenscheindauer 2017 - 2018 .....	11
Abbildung 7 Temperaturen im Jahresverlauf 2017 - 2018 .....	12
Abbildung 8 Offizielles Logo des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 .....	13
Abbildung 9 Darstellung der Regulation des autonomen Nervensystems .....	20
Abbildung 10 Stressreaktion .....	24
Abbildung 11 Darstellung des Lichteffektes auf das zentrale Nervensystem .....	26
Abbildung 12 HRVAnalysis 1.2. Software .....	31
Abbildung 13 HRVAnalysis 1.2. Software .....	31
Abbildung 14 Gletscherkurs am Taschachferner .....	38
Abbildung 15 Brandbekämpfungskurs .....	39
Abbildung 16 Landebahn Flugzeug Polar 6 - Typ Basler BT-67 .....	40
Abbildung 17 FS Polarstern .....	40
Abbildung 18 EKG Recorder eMotion Faros 90° .....	41
Abbildung 19 HRVAnalysis 1.2. Ausschluss von Extrasystolen .....	42
Abbildung 20 HRVAnalysis 1.2. Festlegung des Auswertungszeitraumes .....	43
Abbildung 21 HRVAnalysis 1.2. Identifizierung einer Sportaktivitätsphase .....	43
Abbildung 22 Box-and-whisker-plot NN-Intervall.....	48
Abbildung 23 Liniendiagramm monatlich Mittelwerte NN Intervall.....	49
Abbildung 24 Liniendiagramm nach Lichtperioden Mittelwerte NN Intervall .....	51
Abbildung 25 Box-and-whisker-plot SDNN Intervalle .....	53

Abbildung 26 Liniendiagramm monatlich Mittelwerte SDNN .....	54
Abbildung 27 Liniendiagramm nach Lichtperioden Mittelwerte SDNN .....	56
Abbildung 28 Box-and-whisker-plot pNN50 .....	58
Abbildung 29 Liniendiagramm monatlich Mittelwerte pNN50 .....	59
Abbildung 30 Liniendiagramm nach Lichtperioden Mittelwerte pNN50 .....	61
Abbildung 31 Box-and-whisker-plot rMSSD.....	63
Abbildung 32 Liniendiagramm monatlich Mittelwerte rMSSD .....	64
Abbildung 33 Liniendiagramm nach Lichtperioden Mittelwerte rMSSD .....	66
Abbildung 34 Box-and-whisker-plot Quotient LF/HF .....	68
Abbildung 35 Liniendiagramm monatlich Mittelwerte LF/HF .....	69
Abbildung 36 Liniendiagramm nach Lichtperioden Mittelwerte LF/HF.....	71

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Faktoren der Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Zeitbereich.....	34
Tabelle 2 Faktoren der Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Frequenzbereich.....	36
Tabelle 3 Darstellung der anthropometrischen Daten.....	47
Tabelle 4 Test auf Normalverteilung NN-Intervall monatliche Messung.....	49
Tabelle 5 Paarweise Kontrastuntersuchung NN-Intervall monatliche Messung .....	50
Tabelle 6 Test auf Normalverteilung NN-Intervall Lichtperioden .....	51
Tabelle 7 Paarweise Kontrastuntersuchung NN-Intervall Lichtperioden .....	51
Tabelle 8 Test auf Normalverteilung SDNN monatliche Messung.....	54
Tabelle 9 Paarweise Kontrastuntersuchung SDNN monatliche Messung .....	55
Tabelle 10 Test auf Normalverteilung SDNN Lichtperioden.....	56
Tabelle 11 Paarweise Kontrastuntersuchung SDNN Lichtperioden. ....	56
Tabelle 12 Test auf Normalverteilung pNN50 monatliche Messung.....	59
Tabelle 13 Paarweise Kontrastuntersuchung pNN50 monatliche Messung .....	60
Tabelle 14 Test auf Normalverteilung pNN50 Lichtperioden.....	61
Tabelle 15 Paarweise Kontrastuntersuchung pNN50 Lichtperioden .....	61
Tabelle 16 Test auf Normalverteilung rMSSD monatliche Messung. ....	64
Tabelle 17 Paarweise Kontrastuntersuchung rMSSD monatliche Messung.....	65
Tabelle 18 Test auf Normalverteilung rMSSD Lichtperioden .....	66
Tabelle 19 Paarweise Kontrastuntersuchung rMSSD Lichtperioden.....	66
Tabelle 20 Test auf Normalverteilung LF/HF monatliche Messung.....	69
Tabelle 21 Paarweise Kontrastuntersuchung LF/HF monatliche Messung .....	70
Tabelle 22 Test auf Normalverteilung HF/LF Lichtperioden .....	71
Tabelle 23 Paarweise Kontrastuntersuchung LF/HF Lichtperioden .....	71



# Zusammenfassung

Ein 14-monatiger Aufenthalt in der Antarktis an der Forschungsstation Neumayer III ist für das Team der Überwinternden eine Herausforderung an Psyche und Physis. Soziale Isolation, Reizdeprivation, Leben in einem künstlichen abgeschlossenen Habitat, lebensfeindliche Umgebung, sowie der durch Polarnacht und Polartag alterierte circadiane Rhythmus bedeuten erheblichen Stress für die Überwinternden.

Diese Studie untersucht erstmals, ob eine stressbedingte Veränderung der sympathovagalen Balance anhand von Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität während einer langfristigen antarktischen Überwinterungskampagne beobachtet werden kann.

Insgesamt dreizehn Testpersonen zeichneten jeweils während der Isolationsphasen 2017 und 2018 von Februar bis Oktober monatlich ein 24h EKG auf. Im Rahmen dieser Studie erfolgt die Analyse von Faktoren der Herzfrequenzvariabilität der Zeit- und Frequenzdomäne. Störungsarme Aufzeichnungen der Herzfrequenzvariabilität wurden während der Nachtstunden von 00:00 – 06:00 Uhr erfasst. Es zeigen sich aufschlussreiche Veränderungen der autonomen Regulation über die Isolationsphase der Überwinterung.

So nahm die Dauer einer elektrischen Herzaktion, als wichtiger Indikator für Fitness und Wohlbefinden gegen Ende der Polarnacht deutlich ab. Kohärent hierzu veränderte sich die autonome Regulation des Herzens über den Beobachtungszeitraum. Die Faktoren pNN50 und rMSSD, als Parameter des Einflusses des parasympathischen Nervensystems (Resilienz, Erholungsfähigkeit, Regenerationsfähigkeit), erreichten am Ende der Polarnacht ihren Minimalwert. Der Faktor SDNN unterschritt klinisch etablierte Grenzwerte als Zeichen eines erhöhten kardiovaskulären Morbiditätsrisikos.

Zudem verschob sich das Verhältnis LF/HF, als Indikator der sympathovagalen Balance, mit Zunahme der sympathischen Aktivität unter Abnahme des Parasympathikustonus. Die Studie belegt wegweisend, dass während der Isolationsphase der Überwinterung die sympathovagale Balance mit fortschreitender Isolationsdauer durch sympathischen Einfluss dominiert wird und zum Teil gravierende Veränderungen der Regulation des autonomen Nervensystems beobachtet werden können.

# Abstract

A 14-month stay in the Antarctic at Neumayer III research station is challenging to psyche and physis of the wintering team. Social isolation, deprivation, containment, hostile environment and altered circadian rhythm cause considerable stress for those who winter over.

This study enquires whether a stress-induced alteration of the sympathovagal balance is revealed by shifts in nocturnal heart rate variability (HRV) during a long-term Antarctic wintering campaign.

Thirteen test persons in total recorded a monthly 24-hour ECG during the isolation phase from February to October 2017 and 2018 respectively. This study targets the analysis of representative factors of time and frequency domain of HRV. Reliable recordings of HRV were observed during night hours from 00:00-06:00 UTC, which revealed the modulation of autonomous regulation over the isolation period.

The duration of an electrical heart action decreased significantly towards the end of the polar night. Furthermore, a change in autonomous regulation of the heart could be observed. Parameters that represent the influence of the parasympathetic nervous system (resilience, ability to recover, regenerative capacity), such as pNN50 and rMSSD reached their minimum value at the end of the polar night. Time domain factor SDNN even decreased below clinically established limits as a sign of an increased risk of cardiovascular morbidity. Frequency domain factor LF/HF as an indicator of sympathovagal balance shifted with a gradual increase in sympathetic activity at the expense of parasympathetic activity.

The study holds evidence that during the isolation period of the winter over campaign sympathovagal balance gets more dominated by sympathetic influence and partially severe changes in the regulation of the autonomic nervous system take place.

# 1. Einleitung

*“ Wissen und Erkennen sind die Freude und die Berechtigung der Menschheit. “ (1)*

Alexander von Humboldts Leitbild motiviert Forschende von jeher, Herausforderungen zu überwinden und Entbehrungen auf sich zu nehmen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen und die bestehenden Grenzen des Wissens zu verschieben. Die Pioniere der polaren Erkundung wagten sich hierfür in Regionen vor, die zu den unwirtlichsten und lebensfeindlichsten des Planeten gehören. Der Preis war und ist die Inkaufnahme von physiologischen und psychologischen Anpassungsstörungen.

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung von physiologischen Reaktionen auf Extremerfahrungen und die Ableitung von Mechanismen der menschlichen Adaptation. In Fortführung der erfolgten Grundlagenforschung sollen sich daraus zukünftig Rahmenbedingungen ableiten lassen, die geeignet sind, die körperliche sowie seelische Unversehrtheit und Gesundheit von Forschenden auch in Extremsituationen zu erhalten.

Das Leben im antarktischen Winter stellt besondere physiologische und psychologische Anforderungen an die dort ganzjährig arbeitenden Forschenden (2–7). Gruppen antarktischer Überwinterungen sind über Monate isoliert. Hilfe von außen ist während des antarktischen Winters nicht möglich. Innerhalb der kleinen Teams ist eine enge und vertrauensvolle Kooperation unerlässlich. Die Überwinterungsgruppen sind in hohem Maße von der Funktionstüchtigkeit ihrer technischen Anlagen und lokalen Infrastruktur abhängig. Extreme Kälte und Stürme erschweren Außenaktivitäten, so dass das Leben über weite Teile in umgrenzten künstlichen Habitaten stattfindet. Phasen der Dunkelheit während der Polarnacht wechseln sich mit Phasen anhaltender Lichtexposition während des Polartages ab.

Um die Auswirkungen der extremen antarktischen Umgebungsbedingungen auf den Menschen zu verstehen, werden seit den 60er-Jahren des 20. Jahrhunderts auf antarktischen Forschungsstationen begleitende medizinisch-physiologische Studien durchgeführt (7,8). Die menschliche Anpassungsfähigkeit an widrige Umgebungsbedingungen gilt als wichtige Einflussgröße für das Gelingen oder Scheitern von Forschungsmissionen in Extremsituationen (4,9). Auch auf der deutschen Forschungsplattform Neumayer Station III in der Antarktis wurden Überwinterungsteams hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Anpassung an langfristige Isolation, sozialen Stress sowie extreme Lichtperioden untersucht. Hierfür wurden unter anderem Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität als Marker der kardialen Regulation des autonomen Nervensystems und damit als Hinweisgeber auf die vegetative Anpassungsleistung des Menschen genutzt (10,11). Die kardiale Regulationsanpassung des autonomen Nervensystems wurde in vorangegangenen Untersuchungen, während der Überwinterungen 2013 bis 2015, anhand von monatlichen morgendlichen Kurzzeitmessungen der Herzfrequenzvariabilität bei den Stationsbesatzungen am wachen Probanden erfasst (12).

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht nunmehr die Untersuchung der Überwinterungsgruppen mit monatlichen Aufzeichnungen der Herzaktivität über 24 Stunden und Auswertung von 6 Nachtstunden in den Jahren 2017 und 2018. Diese Messungen ermöglichen die Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Frequenz- und Zeitbereich (13) unter besonderer Betrachtung der Nachtstunden der zweiten Nachthälfte. Damit konnte eine störungsarme und für die Änderung der sympathovagalen Balance beispielhafte 6-stündige Zeitspanne im Schlaf (14,15) erstmals genauer betrachtet werden.

Die Untersuchung der überwinternden Stationsbesatzungen zielt auf Erkenntnisse hinsichtlich der Änderung der kardialen Regulation durch das autonome Nervensystem unter stressinduzierenden Lebensbedingungen, physiologischen und psychischen Herausforderungen bei fortschreitender Dauer der Isolation einer antarktischen Überwinterung (16,17).

Die Arbeit gliedert sich in fünf wesentliche Abschnitte.

1. Im einleitenden Teil werden die historischen, geographischen und meteorologischen Basisinformationen und die Bedingungen vor Ort dargelegt. Wesentliche Grundlagen der Physiologie und speziell der Herzfrequenzvariabilität leiten über zur Fragestellung.
2. Der Aufbau der Studiendurchführung, die Probandengewinnung, die Durchführung, sowie Werkzeuge und Methodik der Datenaufbereitung und Verarbeitung werden im Methodenteil vorgestellt.
3. Die Ergebnisse werden im Ergebnissteil dargestellt.
4. Im Rahmen der Diskussion werden die Ergebnisse eingeordnet, Antworten auf die Fragestellung gegeben und Einschränkungen der experimentellen Studie gegenübergestellt.
5. Abschließend wird aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Ausblick auf die sich zukünftig anschließende Forschungsarbeit und mögliche Konsequenzen aus dieser Arbeit gegeben.

## 1.1. Forschungsstandort Antarktis

Die antarktischen Gebiete umfassen die Region zwischen Südpol und 60° südlicher Breite. Antarktika ist mit fast 13,2 Millionen km<sup>2</sup> der fünftgrößte Kontinent der Erde. Der die Antarktis umfließende Zirkumpolarstrom bewirkt, dass die Temperaturen in der Antarktis größtenteils unterhalb des Gefrierpunkts liegen. Der Eisschild der Antarktis ist die größte zusammenhängende Eismasse der Erde. Die Fläche des Eisschildes wird auf 13,92 Millionen Quadratkilometer und das Eisvolumen auf 26,92 Millionen Kubikkilometer geschätzt (18). Der Eisschild bedeckt den Kontinent fast vollständig.



Abbildung 1 Karte der Antarktis United States Central Intelligence Agency's World Factbook

Die Durchschnittstemperatur im Bereich des Festlands liegt bei -55°C. Während der antarktischen Polarnacht können über dem Festland Temperaturen von weniger als -80°C auftreten. In Küstennähe können im Sommer Temperaturen über dem Gefrierpunkt erreicht werden. Im Mittel gilt die Antarktis als trockenste und kälteste Wüste der Welt (19).

Aus der geographischen Lage südlich des Südpolarkreises resultieren Phasen der Polarnacht und des Polartages. Am Südpol wechseln sich jeweils 6 Monate Dunkelheit mit 6 Monaten Tageslicht ab (20).

Die systematische Erforschung der Antarktis begann vor ca. 245 Jahren mit der Südpolarexpedition von James Cook. Es sollte noch bis zum 28. Januar 1820 dauern, bis Fabian Gottlieb Bellingshausen auf seiner Expedition im Auftrag des russischen Zaren erstmals das antarktische Schelfeis erblickte. Aufenthalte bzw. Expeditionen im Inneren des Kontinents wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts unter teils erheblichen Entbehrungen vorangetrieben. So endete das Rennen zum geographischen Südpol, welches der Norweger Roald Amundsen im Jahr 1911 für sich entschied, für den Briten Robert Falcon Scott und seine Begleiter mit dem Tod.

Erst während des "Internationalen Geophysikalischen Jahres" 1957-58 gelang Fuchs und Hillary eine vollständige Durchquerung des Kontinents. Dem technischen Fortschritt seit den Fünfzigerjahren des 20. Jahrhunderts ist es zu verdanken, dass ein dauerhafter Aufenthalt von Menschen auf dem Kontinent möglich wurde (2).

Mit dem Antarktisvertrag von 1959 hat sich die Staatengemeinschaft zu einer friedlichen Nutzung und schonenden Erforschung des antarktischen Kontinents verpflichtet. Mit diesem Anspruch werden 40 Forschungsstationen von 29 Nationen unter hohem technischem und logistischem Aufwand ganzjährig betrieben (6). Forschungsfelder auf Forschungsstationen in der Antarktis umfassen Atmosphärenchemie, Geophysik, Seismologie, Glaziologie, Meteorologie, Astronomie, Biologie und Physiologie des Menschen (21). Auf diesen 40 Stationen wird ein ganzjähriger Betrieb durch Überwinterungsbesatzungen sichergestellt (22,23).

Die antarktischen Forschungstätigkeiten lassen sich nach Dauer und Zielsetzung kategorisieren:

#### Kurzfristiger Einsatz

*Traversen/Expeditionsfahrten:* Es stehen Untersuchungen an speziellen Punkten von Interesse im Vordergrund. Hierzu werden Sommercamps mit begrenzter Nutzungsdauer errichtet.

*Sommerkampagnen:* Hier nutzen wissenschaftliches und technisches Personal die günstigeren Klima- und Lichtverhältnisse der Sommermonate für Experimente und/oder technische Arbeiten in direkter Umgebung der jeweiligen Forschungsstationen.

#### Langfristiger Einsatz

*Überwinterungskampagnen:* Überwinternde Teams bestehend aus wissenschaftlichem und technischem Personal sorgen für die fortlaufende Erhebung von wissenschaftlichen Daten und ein reibungsloses Funktionieren der technischen Ausrüstung auch in den Wintermonaten. Die Dauer der Überwinterung beträgt typischerweise 8 bis 15 Monate (5,24).

Die deutsche Antarktischforschung umfasst beide genannten Kategorien. Ausgangs- und Endpunkt der Forschungsaktivitäten bildet regelhaft die einzige deutsche ganzjährig betriebene Forschungsbasis Neumayer Station III (Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung).

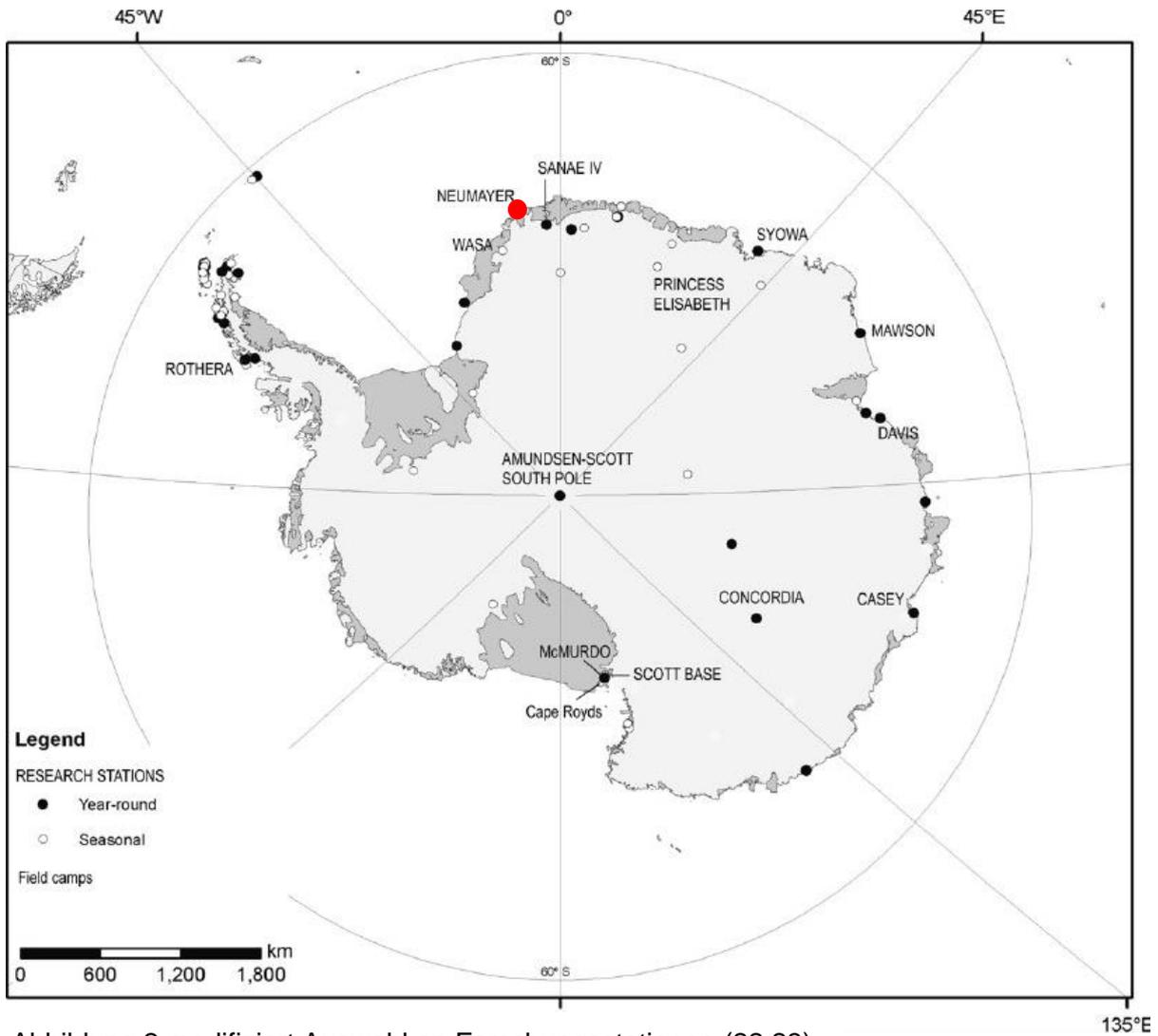


Abbildung 2 modifiziert Auswahl an Forschungsstationen (22,23)

## 1.2. Neumayer Station III

Am 24. Februar 1981 begann mit der Inbetriebnahme der ersten Südpolarstation "Georg-von-Neumayer" die Präsenz der Bundesrepublik Deutschland in der Antarktis. Zuvor war seit April 1976 die Deutsche Demokratische Republik mit der "Georg-Forster-Station" in der Antarktis vor Ort (26). Die deutsche Forschungsstation Neumayer III wurde und wird durch das Alfred-Wegener-Institut (AWI), Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung im Auftrag der Bundesrepublik Deutschland betrieben. Grundlage des deutschen Forschungsengagements in der Antarktis bildet der Antarktis Vertrag vom 23. Juni 1961. Deutschland trat dem Antarktisvertrag am 5. Februar 1979 als Vertragsstaat bei und erhielt mit der Einrichtung der Südpolarstation "Georg-von-Neumayer" Konsultationsstatus (27). Im Februar 2009 wurde die aktuelle Neumayer-Station III eingeweiht. Die deutsche Forschungsplattform Neumayer-Station III befindet sich auf dem Ekström-Schelfeis, ca. 20km landeinwärts und in unmittelbarer Nähe zur Atkabucht. Das Ekström Schelfeis ist Teil der von Norwegen beanspruchten Region Dronning Maud Land (28). Das Schelfeis unterhalb der Station ist ca. 200 m dick. Zusammen mit dem Eis bewegt sich die Station etwa 160 m pro Jahr in Richtung Meereiskante (29). Die Neumayer Station III verfügt über ca. 4.890 m<sup>2</sup> Nutzfläche verteilt auf 4 Etagen. 2.118 m<sup>2</sup> Fläche stehen als beheizter Wohn- und Arbeitsbereich zur Verfügung.

Maximal 60 Personen können an der Forschungsstation untergebracht werden. Die Station mit Außenmaßen von 68 m Länge, 24 m Breite und einer Höhe von 29 m wurde oberhalb des Schneeniveaus auf 16 hydraulischen Poden errichtet, die einmal pro Jahr gehoben werden, um den jährlichen Schneezutrag auszugleichen (25).



Abbildung 3 Neumayer-Station III im Landeanflug Januar 2018 (Foto: Bernhard Gropp)

Auf der Station werden Wohn- und Arbeitsbereiche, Laboratorien, Sanitäreanlagen, ein Wasch- und Trockenraum, eine Sauna, ein Sportraum, eine Küche und Gemeinschaftsräume bereitgestellt. Während der Überwinterungsperiode von Februar bis Oktober stehen der Crew Einzelzimmer zur Verfügung. Während der Sommerkampagne von November bis Januar sind die Schlafkabinen mit zwei bis vier Personen belegt. Zur Ausstattung der Station gehören Lagerräume und ein Werkstattbereich. Für die medizinische Versorgung stehen ein Behandlungs- und ein Eingriffsraum zur Verfügung. Neben bildgebender und labormedizinischer Diagnostik können im Notfall chirurgische und zahnmedizinische Eingriffe durchgeführt werden. Es besteht eine telemedizinische Anbindung nach Deutschland.



Abbildung 4 Behandlungsraum (Foto: Bernhard Gropp)



Abbildung 5 Eingriffsraum (Foto: Bernhard Gropp)

Die Kommunikation auf Neumayer III wird über eine Satellitenverbindung ermöglicht. Internet und Telefon stehen den Bewohnern der Station kostenfrei zur Verfügung. Die Versorgung der Station erfolgt über den Luft- und Seeweg. Das Versorgungsschiff FS Polarstern des Alfred-Wegener-Institutes liefert einmal im Jahr während der Sommerzeit den Großteil der Verbrauchsgüter sowie technisches Material. Eine Start- und Landebahn auf

komprimiertem Schnee/Eis wird von November bis Februar vorgehalten. Die wissenschaftlichen Aktivitäten an der Station umfassen Atmosphären- und Luftchemie, Meteorologie, Meereisphysik, Geophysik und Biologie.

Im Rahmen des Überwinterungsaufenthaltes werden fortlaufend medizinische und humanphysiologische Studien durchgeführt.

Am Standort der Neumayer Station III herrschen Temperaturen zwischen 0°C im südpolaren Sommer und -45°C im südpolaren Winter. Aus der geographischen Lage S 70°40' W 8°17' resultieren Phasen der Polarnacht, des Polartags und entsprechende Übergangsphasen. Die mittlere jährliche Temperatur betrug im Beobachtungszeitraum 2017/2018 -15,6°C (Januar 2017 -4°C, Juni 2017 -44,3°C). Die mittlere Windgeschwindigkeit im Jahr betrug am Standort 50,4km/h mit Maximalgeschwindigkeiten von 148km/h (September 2017) (29).

### Sonnenstunden 2017 - 2018

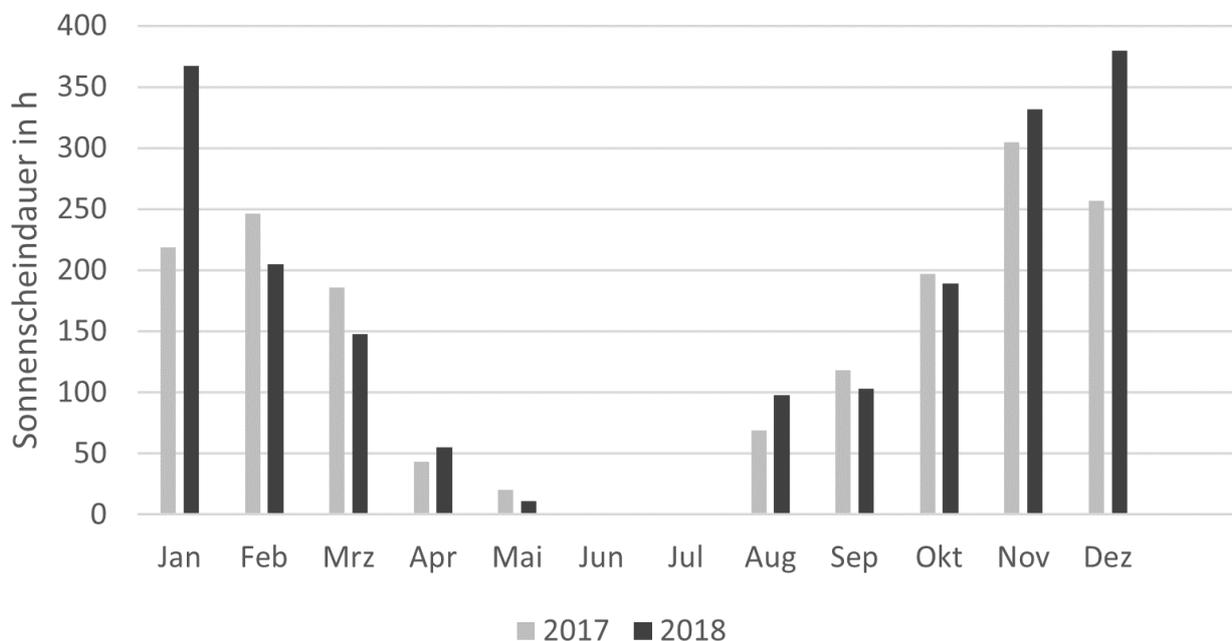


Abbildung 6 Sonnenscheindauer 2017 - 2018 Monatsstatistik Meteorologie Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung

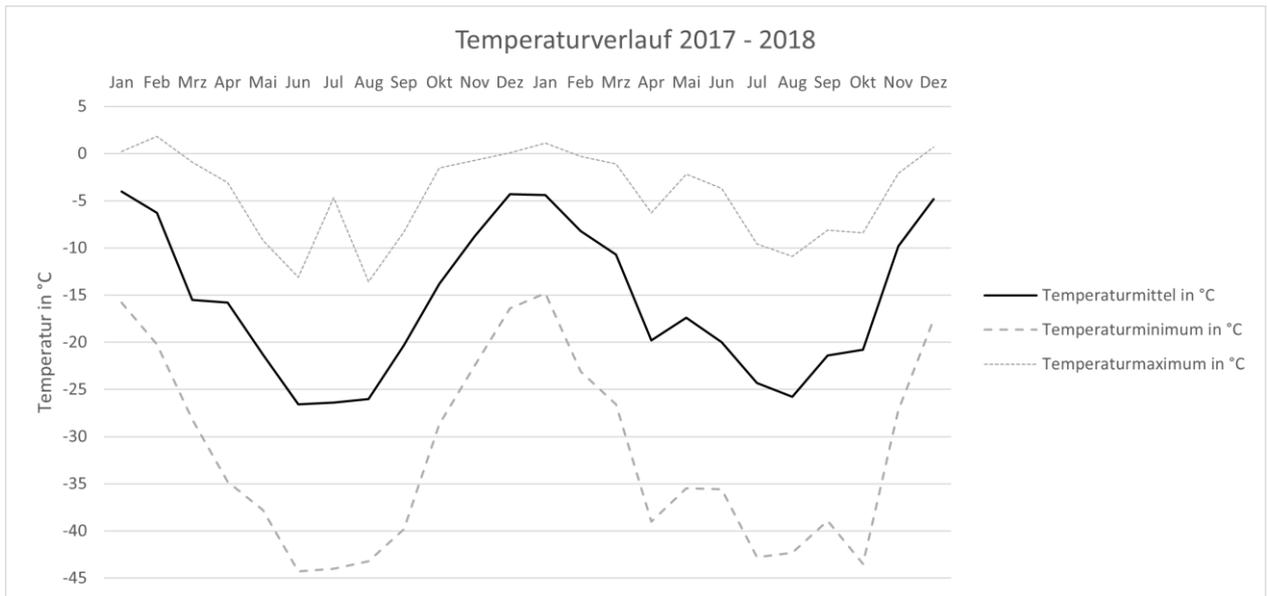


Abbildung 7 Temperaturen im Jahresverlauf 2017 - 2018 Monatsstatistik Meteorologie Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung

### 1.3. Physiologische Forschung in der Antarktis

Bereits auf 1898 datiert die erste Beobachtung einer Überwinterung im antarktischen Eis an Bord der *Belgica* durch deren Schiffs- und Expeditionsarzt Frederick Albert Cook. In seinem Bericht "Through the First Antarctic Night" beschrieb Cook die Härten des antarktischen Winters und den demoralisierenden Effekt von Lichtmangel, Untätigkeit und Langeweile auf die Mannschaft (30).

Nach dem spektakulären Wettlauf zum Südpol durch Amundsen und Scott kühlte das Interesse am Südkontinent ab. Vorerst ruhte das Thema Überwinterung in der lebensfeindlichen Antarktis. Es sollte weitere 45 Jahre dauern, bis im Jahr 1956 eine Expeditionsgruppe der US-Navy den Südpol erreichte und dort bis 1957 die Amundsen-Scott-Station errichtete. Im Zuge des "Internationalen Geophysikalischen Jahres" vom 1. Juli 1957 bis zum 31. Dezember 1958 nahmen die antarktischen Forschungstätigkeiten sprunghaft zu (8,31).



Abbildung 8 Offizielles Logo des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 (8,31)

Die Aktivitäten des "Internationalen Geophysikalischen Jahres" 1957/58 bahnten internationale Abmachungen, die am 01. Dezember 1959 in den Antarktisvertrag mündeten (32). Dieser regelte die dauerhafte Anwesenheit von internationalen Forschungseinrichtungen

auf dem antarktischen Kontinent. Die Forschungsarbeit war geophysikalisch und meteorologisch ausgerichtet. Forschungsschwerpunkte waren Erdmagnetismus, Glaziologie, Ionosphärenforschung, kosmische Strahlung, Meteorologie, Ozeanographie, Seismik, Gravitationsmessungen und Sonnenaktivität. Biologische Studien und physiologische Beobachtungen wurden im Schatten der geophysikalischen Forschungsaktivitäten zunächst durch medizinisches Personal vor Ort durchgeführt. Die systematische Erforschung der menschlichen Anpassung an die antarktische Umwelt begann in den Sechzigerjahren des 20. Jahrhunderts. Die frühen physiologischen Studien befassten sich umfangreich mit Mechanismen der Kälteadaptation, der circadianen Rhythmik, Energiebedarf und Metabolismus unter extremen klimatischen Bedingungen, sowie der psychischen Belastung durch Isolation und Inaktivität (3,7,33,34).

Im Rahmen der antarktischen Überwinterungen bietet sich die Gelegenheit, Gruppen gesunder Probanden in monatelanger Isolation zu beobachten. Die Untersuchungen befassen sich mit potentiellen Auswirkungen von Extremsituationen auf den menschlichen Organismus (35). Die in der Antarktis erarbeiteten Erkenntnisse bezüglich der Anpassung an das Leben in Isolation, Beengtheit und sensorischer Deprivation ermöglichen Rückschlüsse für die Planung weiterer Forschungsmissionen (36–39).

Seit dem Bestehen der Neumayer Stationen II und III kooperiert das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung im Rahmen der physiologischen Feldforschung mit dem Zentrum für Weltraummedizin Berlin der Charité Universitätsmedizin Berlin (ZWMB). Die Zusammenarbeit erfolgte im internationalen Kooperationsverbund mit dem Max-Planck-Institut für Bildungsforschung Berlin, der Ludwig-Maximilian-Universität München, der University of Pennsylvania, der Harvard Medical School,

dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Ziel der fortlaufenden Untersuchungen ist die Erfassung von Veränderungen des menschlichen Organismus als Anpassung an klimatische Bedingungen, wechselnde Lichtperioden, Isolation, Beengung und sensorische Deprivation. Der Schwerpunkt der vorliegenden physiologischen Untersuchung liegt auf der Regulation des autonomen Nervensystems in den Nachtstunden unter langfristig anhaltenden Extrembedingungen während der Isolationsphase einer antarktischen Überwinterung. Das Interesse gilt der Herzfrequenzvariabilität, einer wichtigen Messgröße für die kardiale Regulation durch das autonome Nervensystem und Marker für die vegetative Anpassungsfähigkeit der Probanden.

## 1.4. Physiologische Grundlagen

Am Beispiel der Herzaktion lässt sich die Bedeutung der Regelkreise des autonomen Nervensystems beobachten. Das Zusammenwirken aus Modulation durch Sympathikus, Parasympathikus und Rückkopplungsmechanismen am Herzen ermöglicht es dem menschlichen Organismus, sich fortlaufend an externe und interne Gegebenheiten anzupassen. Der regulierende Einfluss des autonomen Nervensystems auf die Herzaktivität findet seinen Ausdruck vor allem in der Herzfrequenzvariabilität und steht in besonderem Maße für die Adaptationsfähigkeit des menschlichen Organismus (10,11).

### 1.4.1. Das autonome Nervensystem

Das autonome Nervensystem, in Abgrenzung zum somatischen Nervensystem, umfasst die inneren Regelkreise des Organismus und Regulationsmechanismen der Organfunktionen. Mit Hilfe des autonomen Nervensystems gelingt die Koordination von Organsystemen, die Aufrechterhaltung des inneren Milieus, die Regulation der Organleistung und damit umfassende automatisierte Anpassungsleistungen des Organismus (Homöostase), ohne dass kognitive Kapazitäten gebunden werden (40,41). Die Regulation erfolgt durch übergeordnete Zentren im Gehirn sowie durch komplexe hormonelle Steuerungsabläufe. Das autonome Nervensystem besteht aus den Elementen Sympathikus, Parasympathikus und im weiteren Sinne des enteralen Nervensystems.

Sympathikus und Parasympathikus wirken als Gegenspieler (antagonistisch) oder einander ergänzend (synergistisch). Dadurch wird eine differenzierte, den jeweiligen Bedingungen angepasste Steuerung der Organsysteme zur Aufrechterhaltung der Homöostase möglich.

Die Bausteine des autonomen Nervensystems setzen sich zusammen aus peripheren Elementen, welche mit den übergeordneten zentralen Bausteinen verknüpft sind.

Afferente Nervenbahnen der inneren Organe werden als viszerale Afferenzen bezeichnet. Viszerosensorische Fasern laufen zentral im Tractus solitarius zusammen in das zentrale Kerngebiet den Nucleus tractus solitarii und vermitteln Signale von Chemo-, Dehnungs- und Druckrezeptoren und sind somit in verschiedene respiratorische, kardiovaskuläre und intestinale Rückkopplungsmechanismen eingebunden. Der Hypothalamus bildet die Schnittstelle des autonomen Nervensystems mit Kernen des Thalamus, der Pons, des Cerebellums, des insulären Cortex und der Hypophyse als zentralem Element des endokrinen Systems. Nicht zuletzt wirken hierdurch äußere Einflüsse wie Licht, Temperatur, Aktivität, Schlaf, Stress oder Entspannung auf das autonome Nervensystem (42).

## Sympathikus

Der Sympathikus als ergotrop wirkender Teil des autonomen Nervensystems steigert bei Aktivierung die Leistungs- und Aktionsfähigkeit.

Die ersten Neuronen des peripheren Sympathikus sind im thorakalen Rückenmark und den oberen drei Segmenten des lumbalen Rückenmarks lokalisiert. Als zentral übergeordnete Zentren des Sympathikus arbeiten Formatio reticularis, Hirnstamm und Hypothalamus. Diese senden Impulse auf, die im Seitenhorn des Rückenmarks lokalisierten, sympathischen Wurzelzellen. Von dort ziehen sympathische Fasern in paravertebrale Ganglien. Die verknüpften Ganglien bilden den Truncus sympathicus, welcher sich paravertebral nach lumbal und cervical fortsetzt.

In den paravertebralen Ganglien erfolgt die Verschaltung der Sympathikusefferenzen auf ein zweites Neuron. Das postganglionäre Neuron überträgt Impulse am Zielorgan. Abweichend verlassen einige Axone den Grenzstrang ohne vorherige Umschaltung und laufen zu prävertebralen Ganglien im Bereich der Aorta oder zu intramuralen Ganglien an den Zielorganen. Direkt als Zielorgan dient das größte sympathische Paraganglion - das Nebennierenmark, welches seinen Transmitter Adrenalin als Hormon in den Blutkreislauf ausschüttet.

## Parasympathikus

Der Parasympathikus ist der trophotrop wirkende Teil des autonomen Nervensystems. Er vermittelt Erholung und Regeneration der körpereigenen Ressourcen.

Zentrale Kerne des Parasympathikus sind im Hirnstamm und im sakralen Rückenmark lokalisiert. Es ziehen präganglionäre efferente Nervenfasern aus den parasympathischen Kerngebieten mit den Hirnnerven III, VII, IX, X aus dem Hirnstamm in die Ganglien des Zielorganes. Der sakrale Anteil des Parasympathikus entspringt dem Nucleus intermediolateralis und Nucleus intermediomedialis der sakralen Rückenmarkssegmente. Die Umschaltung der parasympathischen Efferenzen erfolgt in den zielorgannahen oder im Zielorgan selbst lokalisierten Ganglien.

## Kardiale Regulation durch das autonome Nervensystem

Unter physiologischen Bedingungen arbeitet das Herz kontinuierlich mit autonomer Erregungsbildung und Erregungsweiterleitung unter dem modulierenden Einfluss des autonomen Nervensystems. Die Erregung entsteht im primären Schrittmachersystem Sinusknoten und folgt dann dem Weg über Vorhof, Atrioventrikulärknoten, His-Bündel,

Kammerschenkel, Purkinje-Fasern bis in das Ventrikelmyokard (43). Das autonome Nervensystem wirkt auf hormonellem und neuronalem Weg direkt auf den primären kardialen Taktgeber - den Sinusknoten. Während der sympathische Einfluss Frequenz, Herzkraft und Erregbarkeit der Herzmuskelzellen steigert, senkt der Parasympathikus die Frequenz und hemmt die Erregungsleitung. Unter sympathischer und parasympathischer Einwirkung auf den Sinusknoten wechseln beide Regulationsmechanismen einander ab oder ergänzen sich entsprechend der physiologischen Erfordernisse. Essenzielle Regelkreise der kardiorespiratorischen Verknüpfung beruhen wesentlich auf Rückkopplung über den Tractus solitarius (Vorhofdehnung, Barorezeptoren, Chemorezeptoren und Dehnungsrezeptoren der Lunge). Eine direkte kardiorespiratorische und intrakardiale Rückkopplung über den Frank-Starling-Mechanismus und die kardioprotektive Wirkung des Bezold-Jarisch Reflexes sichern eine sinnvolle Herzfunktion. Der Bezold-Jarisch-Reflex wird von Rezeptoren des Herzmuskels angestoßen. Bei Sauerstoffmangel wird die Herztätigkeit reduziert, auf diese Weise der Sauerstoffbedarf minimiert und somit das Herz vor Schädigungen geschützt. Durch eine zusätzlich induzierte Vasodilatation der Koronargefäße wird die Sauerstoffversorgung am Myokard verbessert (44). Der Frank-Starling-Mechanismus repräsentiert den intrinsischen Regelkreis des Herzens, welcher Füllung und Auswurfleistung reguliert. Mit zunehmendem diastolischen Füllungsvolumen nimmt das systolische Auswurfvolumen zu. Reduziert sich der venöse Rückstrom, vermindert sich damit das Schlagvolumen. Das angebotene Volumen variiert abhängig von Aktivitätsgrad, intrathorakalem Druck und Körperlage (Orthostase-Reaktion). Der Frank-Starling-Mechanismus am Herzen passt die Kammertätigkeit selbständig an kurzfristige Druck- und Volumenschwankungen an. Ziel ist die Angleichung des Schlagvolumens der beiden

Herzkammern und ein reibungsloser Transport des angebotenen Blutvolumens (45). Der arterielle Baroreflex ist ein negativer Rückkopplungs-Regelkreis. Der Anstieg des Blutdruckes steigert die parasympathische Aktivität über den N. vagus und senkt somit die Herzfrequenz. Umgekehrt entfällt bei starkem Blutdruckabfall der parasympathische Einfluss - die Frequenz und Kontraktilität werden gesteigert. Kardiopulmonale Reflexkreise optimieren die Blutdruckregulation als physiologische Anpassungsleistung bei Änderung des zentralvenösen Füllungsdruckes (Bainbridge-Reflex, Renin-Angiotensin-System, Vasopressin-Regelkreis). Der arterielle Chemoreflex wirkt über die Blutgaszusammensetzung auf die Atemtiefe und verändert wiederum das Wechselspiel von Sympathikus und Parasympathikus. In Ruhe besteht gleichfalls eine sympathische und parasympathische Beeinflussung am Herzen mit Verschiebung zu Gunsten des Parasympathikus (16).

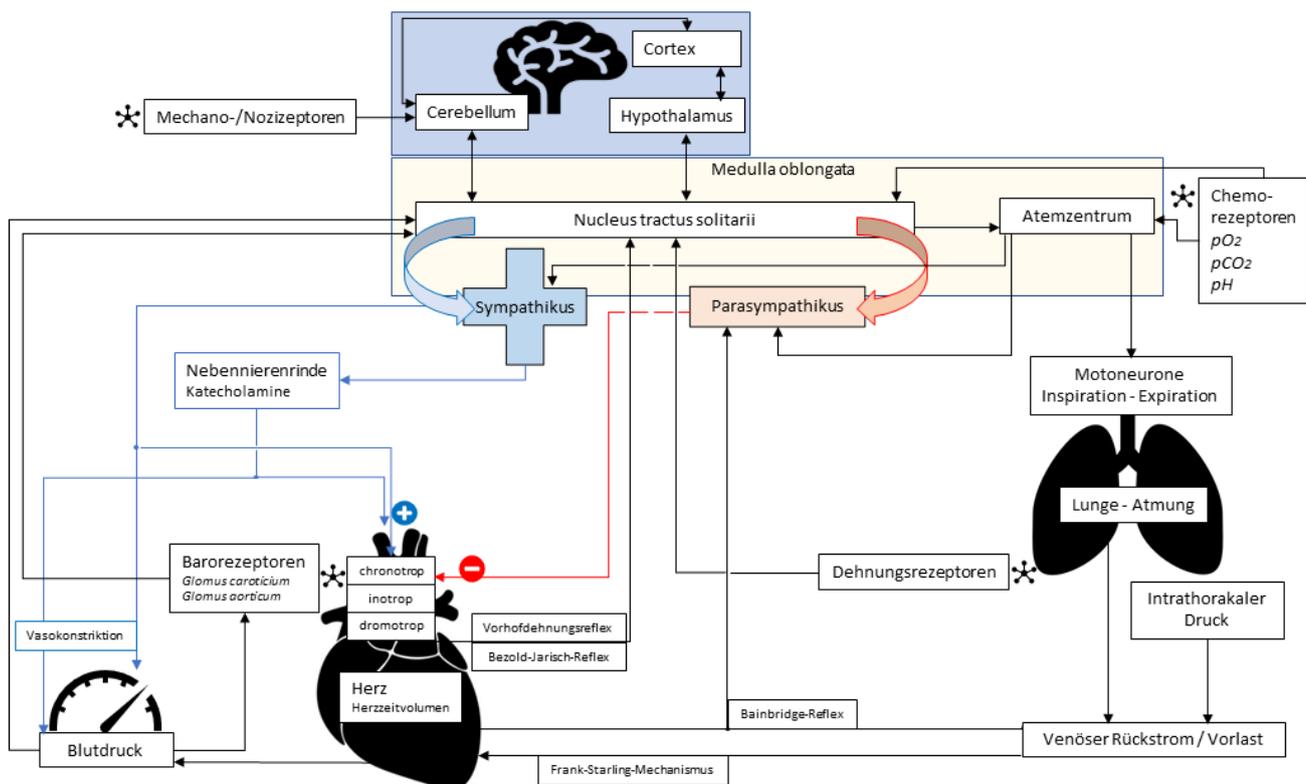


Abbildung 9 schematisch vereinfachte Darstellung der Regulation des autonomen Nervensystems mit Fokus auf die kardiopulmonale Verknüpfung

## 1.4.2. Einflussfaktoren auf die kardiale Regulation durch das autonome Nervensystem

Die Aufrechterhaltung der Homöostase (46,47) durch das autonome Nervensystem ist verschiedenen äußeren Einflussgrößen unterworfen. Im Zuge der Antarktisüberwinterung wird das autonome Nervensystem eines jeden Teilnehmenden durch folgende externe Faktoren beeinflusst (48,49).

### Stressoren

- Extreme Umweltbedingungen
- Gefahren
- Isolation
- Reizdeprivation
- Arbeitsbelastung
- soziale Konflikte

### Lichtexposition

- Leben in einem künstlichen abgeschlossenen Habitat mit künstlichem Licht unter Einschränkung der Bewegungsfreiheit
- Polarnacht und Polartag

### Schlaf

- alterierte circadiane Rhythmik
- gestörte Tagesroutinen

Die vorgenannten Stressoren können einzeln oder in Kombination zu Stress- und Anpassungsreaktionen bei den Probanden führen

## Stress und Stressreaktion

Die Stressreaktion ist eine kombinierte körperliche und psychische Reaktion auf Stressoren, die die Homöostase (46) des Organismus beeinflussen. Die Stressreaktion stellt eine Anpassungsleistung des Organismus dar, um die Unversehrtheit des Individuums sicherzustellen. Im Wesentlichen kann der Organismus auf akute Bedrohungslagen mit Flucht, Kampf oder Erstarrung reagieren (50). Die Fähigkeit des Organismus, auf Stress adäquat zu reagieren, wird als Resilienz bezeichnet (48).

Ist ein Organismus über längere Zeit dem Einfluss von Stressoren ausgesetzt, so kommt es zu einer langfristigen Anpassungsreaktion.

Die initiale Akutreaktion des Organismus zeigt eine zeitlich begrenzte Erhöhung der Widerstandskraft. Gelangen Informationen über Stressoren in das zentrale Nervensystem, so veranlasst dies den Hypothalamus zur Aktivierung des Sympathikus. Es kommt zur Katecholaminausschüttung, in deren Konsequenz Blutdruck und Herzfrequenz steigen. Die vom Hypothalamus ausgeschütteten Hormone initiieren weitere Aktivierungskaskaden. Die Hypophyse sezerniert vermehrt ACTH (adrenocorticotropes Hormon). Die Nebennierenrinde steigert daraufhin ihre Aktivität und setzt zunehmend Glukokortikoide frei. Es kommt zur Restriktion der Proteinbiosynthese und des Immunsystems sowie zu einer Steigerung der Glucosemobilisation aus Leber und Muskeln. Die Muskulatur wird verstärkt durchblutet und die Atemfrequenz bei erhöhtem Energiebedarf gesteigert. Die Leistungssteigerung führt auch zu einer Erhöhung der Körperkerntemperatur. Die Freisetzung von TSH (Thyreoida-stimulierendes-Hormon) steigert die Thyroxinausschüttung der Schilddrüse, steigert den oxidativen Stoffwechsel und erhöht die Katecholaminsensitivität des Organismus. Ebenfalls durch die Hypophyse bereitgestellte Endorphine bewir-

ken eine Hemmung der Schmerzempfindung. Ein negativer Rückkopplungsmechanismus stellt sicher, dass bei Reduktion des Stressniveaus die akute Anpassungsreaktion abklingt (41). Der akuten Anpassungsreaktion folgt die Widerstandsphase. Ziel des Organismus ist es hierbei, das Stressniveau abzubauen und in die Homöostase zurückzukehren. Es findet unter anderem eine Neubewertung der Stressoren statt. Daraufhin folgt entweder eine Gewöhnung mit entsprechender Reduktion des Aktivierungsgrades oder der Organismus versucht weiterhin, den erhöhten Grad an Aktivität und Leistungsbereitschaft aufrecht zu erhalten (47). Hält die Stressreaktion langfristig an, so tritt der Organismus in die Erschöpfungsphase ein. Für den Fall, dass der Grad der Aktivierung nicht reduziert werden kann, sind psychische und physische Störungen die Folge. So können bei Daueraktivierung unter anderem kognitive Leistungsstörungen, Wahrnehmungsstörungen, Schlafstörungen, Befindlichkeitsstörungen, Angststörungen, Aggressivität, chronische Erschöpfung und anhaltende autonome Dysbalance beobachtet werden (40,42,51).

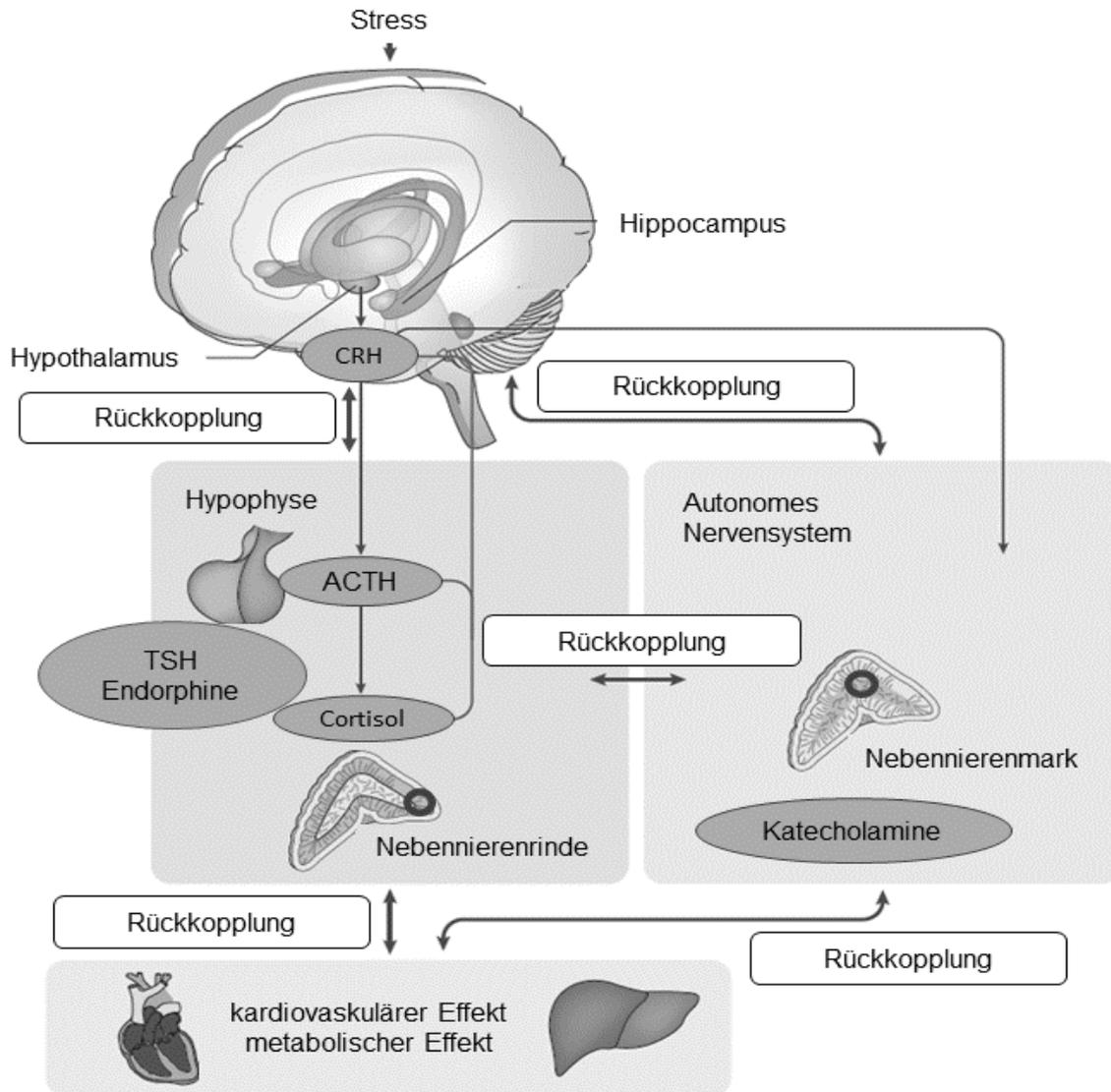


Abbildung 10 modifiziert (115) Stressreaktion vermittelt über die Regulation Hypothalamus -> Hypophyse -> Nebennierenrinde und die Katecholaminwirkung durch Regulation des Nebennierenmarks. CRH, Corticotropin-releasing Hormon; ACTH, Adrenocorticotropes Hormon

## Lichtexposition

Menschen beurteilen ihre subjektive Leistungsfähigkeit oft als abhängig von der jahreszeitlichen Lichtexposition. Diesem Empfinden liegt ein Wirkmechanismus zur Verarbeitung von Lichtreizen im Organismus von Säugetieren zugrunde (52). Hierbei wird der Lichtreiz über eine Schnittstelle in das zentrale Nervensystem übergeleitet. Die Verknüpfung des lichtsignalerfassenden Auges mit den Kernen des Hypothalamus erfolgt über den Nucleus suprachiasmaticus. Der Nucleus suprachiasmaticus ist ein paarig angelegtes Neuronengeflecht im vorderen Hypothalamus oberhalb des Chiasma opticum. Signale der retinalen Photorezeptoren werden via retinohypothalamischen Trakt über den Nucleus suprachiasmaticus bis in den Hypothalamus, den Thalamus, die Hypophyse, die Raphe Kerne und die Epiphyse fortgeleitet. Dort wird durch den Lichtreiz die motorische Aktivität, das Durstgefühl, der Stoffwechsel, das Sexualverhalten, die Körpertemperatur, der Schlaf-Wachzyklus und im Speziellen die endokrine Ausschüttung von ACTH (adrenocorticotropem Hormon), TSH (Thyreoidea stimulierendem Hormon), Corticosteroiden, Prolactin, Somatotropin, Melanotropin, Melatonin, Serotonin und Gonadotropinen beeinflusst (53,54). Über die Wirkung des Hypothalamus auf sympathische und parasympathische Kerne des Tractus solitarius verändert die Lichtexposition die Aktivität und Regulation des autonomen Nervensystems abhängig von den jahreszeitlichen Lichtperioden (55,56).

Der auf die Netzhaut einwirkende Lichtreiz erfüllt zwei wichtige Funktionen. Zum einen dient er dem Sehen, zum anderen synchronisiert er die endogene circadiane Rhythmik und stellt den Organismus korrekt auf den 24-Stunden-Tageslauf ein. Der circadiane Schrittmacher, welcher in den suprachiasmatischen Kernen lokalisiert ist, moduliert das

kardiovaskuläre System. Die Lichteinwirkung beeinflusst über die Regulation des autonomen Nervensystems die kardiovaskuläre Funktion (57,58).

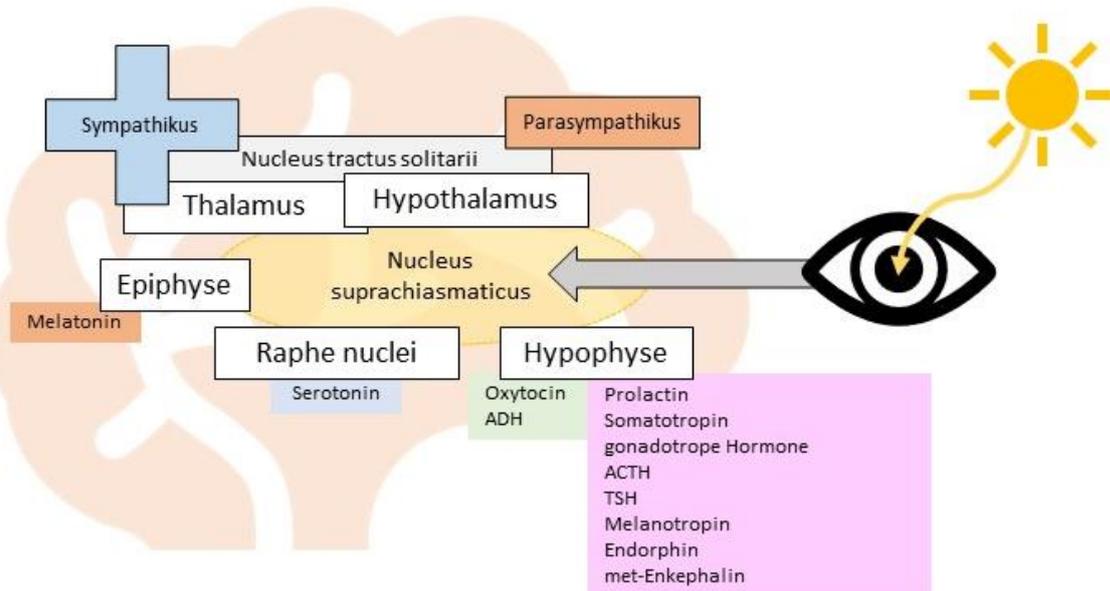


Abbildung 11 vereinfachte Darstellung des Lichteffektes auf das zentrale Nervensystem

Bereits während der ersten antarktischen Überwinterung 1898 auf ca. 71° südlicher Breite beschrieb, der Schiffsarzt Frederik A. Cook an Bord des Expeditionsschiffes "Belgica" den Einfluss der Lichtexposition. *"The sun seems to supply an indescribable something which controls and steadies the heart. In its absence it goes like an engine without a governor. - Die Sonne scheint etwas Unbeschreibliches zu liefern, welches das Herz steuert und stabilisiert. In seiner Abwesenheit schlägt es wie ein Motor ohne Regelung. ...Most dangerous of all were the cardiac and cerebral symptoms. The heart acted as if it had lost its regulating influence. Its action was feeble, but its beats were not increased until other dangerous symptoms appeared. Its action was weak, irregular, and entirely unreliable throughout the night. - Am gefährlichsten waren die kardialen und zerebralen Symptome. Das Herz verhielt sich, als hätte es seinen regulierenden Einfluss verloren.*

*Die Herzfunktion war schwach, die Herzfrequenz wurde nicht erhöht, bis andere gefährliche Symptome auftraten. Die Herztätigkeit war schwach, unregelmäßig und völlig unzuverlässig während der Nacht (Polarnacht)“ (30).*

## Schlaf und autonomes Nervensystem

Schlaf bezeichnet einen wiederkehrenden natürlichen Zustand verminderter kognitiver und motorischer Aktivität. Das Bewusstsein ist stark eingeschränkt, die Reaktion auf äußere Stimuli reduziert (59). Im Gegensatz zu pathologischen Bewusstseinstrübungen kann der unmittelbare Wechsel in den Wachzustand erfolgen. Die Funktion des Schlafes ist nicht abschließend geklärt. Nachweislich ist Schlaf essentiell zur Aufrechterhaltung von physiologischer Homöostase und Resilienz (59). Eine Vielzahl von Krankheitsbildern sind mit gestörter Schlaffunktion assoziiert. Beispielhaft genannt seien Depression (60), Schizophrenie (61), Autismus (62–64), Alzheimer (65), Störungen der Immunantwort (59,66) und Störung der metabolischen Regulation (67).

Ein Schlafzyklus besteht aus 4 Schlafstadien, wobei der Schlafzyklus vier- bis sechsmal pro Nacht mit einer Dauer von ca. 90 Minuten durchlaufen wird. Im Verlauf einer Nacht nimmt die Anzahl der non-rapid-eye-movement Episoden ab und die Episoden des rapid-eye-movement zu (59,68).

Stadium: non-rapid eye movement -Schlaf (NREM)

Stadium N1: Einschlafphase

Stadium N2: stabiler Schlaf

Stadium N3: Tiefschlaf (Slow-Wave-Schlaf)

Stadium R: rapid-eye-movement – Schlaf (REM)

In den Episoden des NREM überwiegen anabole Stoffwechselfunktionen mit Beziehungen zum parasympathischen Anteil des autonomen Nervensystems.

Im REM-Schlaf hingegen dominieren die sympathisch modulierten Körperfunktionen - viele Organsysteme sind in dieser Phase vergleichbar aktiv wie im Wachzustand. Die Schlafregulation folgt dem circadianen Rhythmus. Als wesentlicher Taktgeber gilt der Nucleus suprachiasmaticus im Hypothalamus. Der endogene auf ungefähr 25 Stunden eingestellte Rhythmus wird korrigierend durch optische Lichtreize auf unsere Tageslänge von 24 Stunden synchronisiert. Schlaf und Wachzustand unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Einflusses des autonomen Nervensystems. Im Wachzustand dominiert der Sympathikustonus. Die Herzfrequenz ist vergleichsweise höher und unet auf Grund äußerer Einflüsse und Störfaktoren (69). Anhand physiologischer Veränderungen der kardialen und respiratorischen Regulation (Herzfrequenz, Blutdruck, Atemfrequenz) und Messungen im Elektroencephalogram (EEG) sowie Elektromyogram (EMG) kann von außen beobachtend zwischen Wach- und Schlafzustand unterschieden werden (70,71). Die Aktivität der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrindenachse ist im Schlaf nur gering ausgeprägt. Kortisolwerte sind zum Schlafbeginn vermindert. Gleichzeitig ist der Sympathikustonus bei herabgesetzter Hypothalamusaktivität zum Beginn der Nacht ebenfalls vermindert. Während des NREM-Schlafes dominiert das parasympathische Nervensystem, der sympathische Tonus erhält weniger Einfluss und der Metabolismus erreicht die niedrigsten Werte. Die Herzfrequenz sinkt und der Herzrhythmus verstetigt sich (69,72). Mit voranschreitender Schlafdauer und zunehmenden REM Schlafphasen sowie abnehmendem Tiefschlafanteil nimmt der Einfluss des Sympathikus erneut zu (71) und das Erwachen in den Morgenstunden wird eingeleitet. Die Konzentration von Kortisol erreicht in den Morgenstunden ihr Maximum (66,73,74). Die menschliche Schlaffunktion und ihre zugrunde liegende circadiane Taktgebung sind somit eng mit der Regulation des autonomen Nervensystems verknüpft.

### 1.4.3. Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenzvariabilität (engl. heartrate variability, HRV) beschreibt die kontinuierliche Veränderung der Dauer der Intervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Herzschlägen. Das gesunde Herz schlägt nicht gleichförmig, sondern oszilliert kontinuierlich. Das autonome Nervensystem im Zusammenspiel mit multiplen Regelkreisen moduliert die Herzfunktion fortlaufend entsprechend der Anpassung zur Aufrechterhaltung der Homöostase (13,17,75,76). Ausdruck dieser fortlaufenden Regulation ist die Herzfrequenzvariabilität.

#### Bedeutung und Anwendung der Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenz und die Herzfrequenzvariabilität sind als klinische diagnostische Indikatoren etabliert und akzeptiert (13). Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität und damit der autonomen Regulation können im Zusammenhang mit verschiedenen klinischen Risikofaktoren, wie Diabetes mellitus (77), Rauchen (78), Stress (12,79,80), chronischen Herzerkrankungen und Herzinsuffizienz (81) beobachtet werden. Bereits 1965 konnte mit Anwendung der Kardiotokographie fetaler Stress mit einer Reduktion der Herzfrequenzvariabilität korreliert werden. Der Zusammenhang war so überzeugend, dass die fetale Kardiotokographie als Standardanwendung Eingang in den Katalog der Vorsorgemaßnahmen während der Schwangerschaft gefunden hat (82). Später zeigte sich, dass bei Patienten nach Myokardinfarkt eine Reduktion der Herzfrequenzvariabilität mit einem deutlich erhöhten Risiko des plötzlichen Todes einhergeht (83). Zahlreiche Studien haben den Nachweis geführt, dass sich die Herzfrequenzvariabilität als starker Indikator zur Abschätzung des Mortalitätsrisikos eignet und Patienten mit erhöhtem kardiovaskulärem Risiko identifiziert werden können. Die Analyse der Herzfrequenzvariabilität ist heute ein etabliertes Instrument der medizinischen Diagnostik des erkrankten Menschen (13).

Auch am gesunden Menschen wird die Analyse der Herzfrequenzvariabilität genutzt. Ein Anwendungsgebiet ergibt sich im Rahmen der Sportwissenschaften bei der Überwachung von Trainings- und Wettkampfleistungen. Das regelhafte Monitoring der Herzfrequenzvariabilität zur Beurteilung des Belastungs- und Regenerationsmanagements gilt als wegweisend in der Leistungssportbezogenen Trainingsplanung (17).

Menschen in Extremsituationen und deren resultierenden physiologischen Veränderungen standen im Mittelpunkt dieser Untersuchung von autonomen Regulationsmechanismen. Sind Probanden einer Stresssituation ausgesetzt, werden Anpassungen an externe und interne Störgrößen erforderlich. Diese Anpassungsleistung des autonomen Nervensystems kann durch die Analyse der Herzfrequenzvariabilität überwacht und beurteilt werden (13,84). Die vorliegende Arbeit liefert Erkenntnisse zur Adaptionfähigkeit des gesunden Organismus an eine Ausnahmesituation. Grundlage dafür ist die Datenreihe der Herzfrequenzvariabilität über den kompletten Zeitraum der Isolationsphase der antarktischen Überwinterung. Zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität erfolgte die Erfassung der Herzfrequenz mittels EKG oder Pulsrecorder.

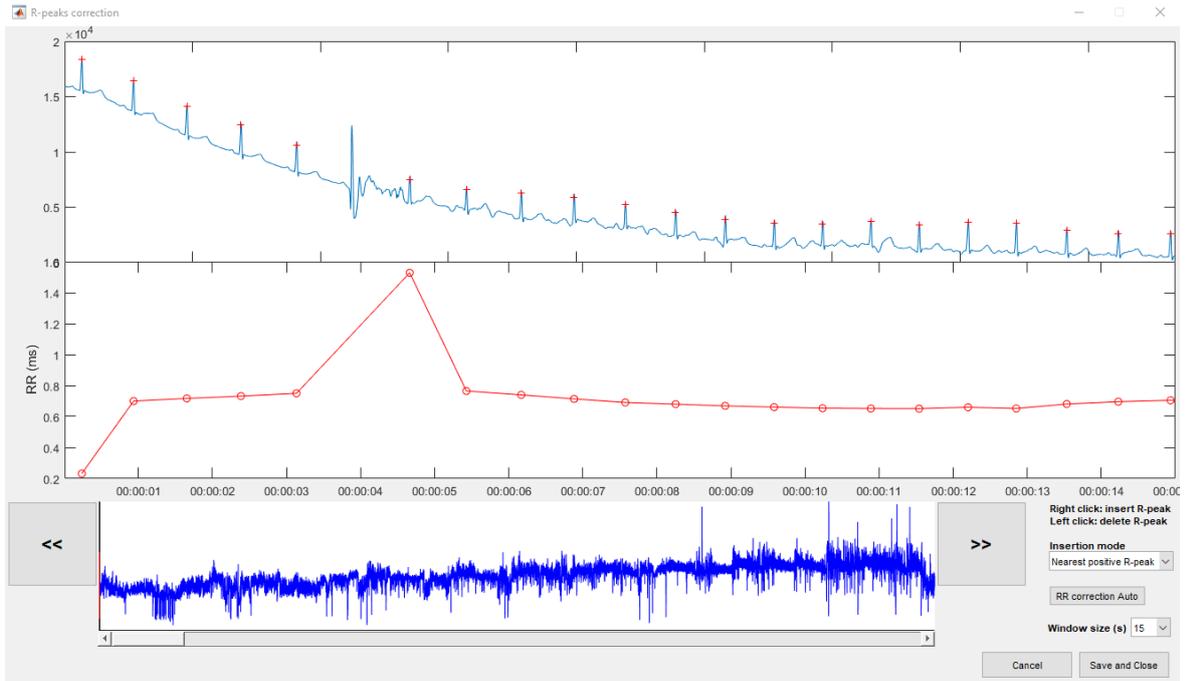


Abbildung 12 HRVAnalysis 1.2. (85) EKG-Darstellung Identifizierung von R Zacken nach Abschluss von Extrasystolen

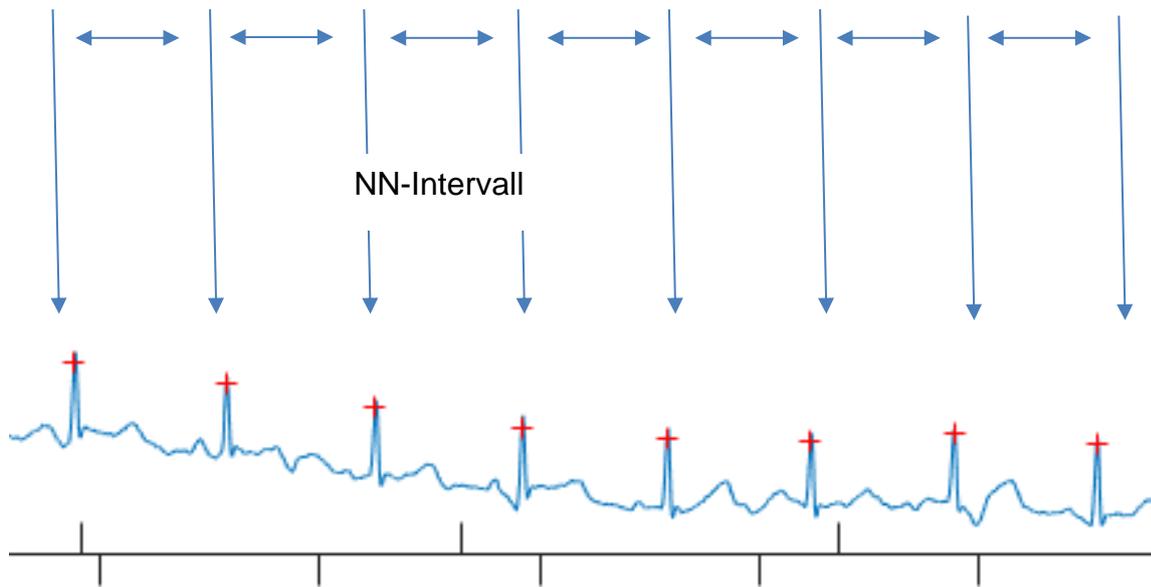


Abbildung 13 HRVAnalysis 1.2. (85) EKG-Darstellung Festlegen eines NN-Intervalls

Kurzzeitmessungen der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität über 5-20 Minuten zielen insbesondere auf Veränderungen der Physiologie des gesunden Probanden, auf mögliche Trainingseffekte bzw. physiologische Herausforderungen. Die Erfassung der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität über mehrere Stunden gibt Aufschluss über langfristige physiologische Veränderungen und eventuelle Störungen.

Die Herzfrequenzvariabilität wird in verschiedenen Kategorien analysiert. Typischerweise erfolgt die Analyse in der Zeit- sowie in der Frequenzdomäne (10,13,75,76). Die unterschiedlichen Parameter der Zeit- bzw. der Frequenzdomäne beleuchten verschiedene Aspekte der kardialen Regulation durch das autonome Nervensystem (12,13,86,87).

#### Analyse der Herzfrequenzvariabilität in der Zeitdomäne

Die Analyse im Zeitbereich quantifiziert die Variabilität des Zeitintervalls zwischen zwei aufeinanderfolgenden elektrischen Herzaktionen und leitet weiterführende Faktoren (13,88,89) ab.

Das *RR-Intervall* (Abstand zwischen zwei R Ausschlägen im EKG) beschreibt die Dauer einer elektrischen Herzaktion und wird in Millisekunden angegeben.

Synonym wird in der Literatur die Bezeichnung *NN-Intervall* (Normal-Sinus-Normal-Sinus-Intervall) benutzt. Aus der Dauer der elektrischen Herzaktion leitet sich die Herzfrequenz ab. Die Herzfrequenz in Ruhe dient als Indikator für Fitness und Wohlbefinden. Am gesunden Herzen gilt: je niedriger die Ruheherzfrequenz, desto höher der Grad an Fitness und Wohlbefinden.

Die Standardabweichung der NN-Intervalle *SDNN* (Standard deviation of all NN intervals) gibt Auskunft, inwiefern die jeweiligen Intervalle im Mittel vom Durchschnitt aller Intervalle abweichen. Ein größerer Wert bedeutet eine höhere gesamte Herzfrequenzvariabilität

und damit ein ausgeprägteres Anpassungsvermögen. SDNN ist in der klinischen Risikobewertung einer Herz-Kreislauf-Erkrankung als klinischer Standard etabliert. Ein Wert von unter 50 ms wird klinisch mit einem erhöhten Risiko für Morbidität und Mortalität verbunden, bei Werten  $>100$  ms wird das Risiko niedrig eingeschätzt (13,88)

Die Standardabweichung der NN-Intervalle in aufeinanderfolgenden 5-minütigen Kurzzeitintervallen einer Messung zur Evaluation der Schwankungen über den Messzeitraum *SDANN* (Standard deviation of the averages of NN intervals in all 5-minute segments of a recording) repräsentiert insgesamt die circadiane und neuroendokrine Aktivität des Organismus.

Die Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle *rMSSD* (Root Mean Square of Successive Differences) ist ein Parameter der Parasympathikusaktivität und steht für die Regenerationsfähigkeit des Körpers. Je niedriger ein *rMSSD* Wert, desto höher das klinische Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko. Dies konnte exemplarisch im Rahmen einer Studie zum plötzlichen ungeklärten Tod im Rahmen epileptischer Grunderkrankungen beobachtet werden (90).

Der Prozentsatz der NN-Intervalle mit mindestens 50 Millisekunden Abweichung vom vorausgehenden NN-Intervall *pNN50* (Percentage of differences between adjacent NN intervals that are greater than 50 milliseconds) wird als Kenngröße hinsichtlich des Einflusses des parasympathischen Nervensystems bewertet. Je höher der Wert, desto günstiger hinsichtlich Resilienz und Erholungsfähigkeit (13).

Tabelle 1 Faktoren der Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Zeitbereich

Bezeichnung	Berechnungsformel	Einheit
NN		Millisekunden [ms]
SDNN	$SDNN = \sqrt{\sum_{i=1}^n (NN_i - \overline{NN})^2} \text{ [ms]}$	Millisekunden [ms]
SDANN	$SDANN = \frac{\sum_{i=1}^n 5 \min \overline{NN}_i}{n_{5 \min \overline{NN}}} \text{ [ms]}$	Millisekunden [ms]
rMSSD	$rMSSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NN_{i+1} - NN_i)^2}{n - 1}} \text{ [ms]}$	Millisekunden [ms]
pNN50	$pNN50 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\geq 50ms}} n_{i \geq 50ms}}{n} \times 100[\%]$	Prozent [%]

## Analyse der Herzfrequenzvariabilität in der Frequenzdomäne

Analysen der Frequenzdomäne beurteilen die Verteilung der absoluten oder relativen Leistung in sich überlagernden Frequenzbändern. Oszillationen in verschiedenen Frequenzbereichen repräsentieren unterschiedliche Einflussgrößen auf das autonome Nervensystem. Die Analyse im Frequenzbereich erfolgt nach Fourier Transformation im Sinne einer Aufteilung in einzelne Frequenzbänder. Die verschiedenen Frequenzbereiche werden mit intrinsischen, autonomen, circadianen und endokrinen Faktoren in Zusammenhang gebracht. Entsprechend der Frequenz können die einzelnen Frequenzbereiche über eine kurzzeitige Messung oder für die langsam schwingenden Systeme über die Langzeitmessung erfasst werden. Niederfrequente Oszillationen erfordern die Messung über 24 Stunden (13,75,91).

Es können folgende Faktoren betrachtet werden.

*Total Frequency Power (TP)* Gesamtfrequenzspektrum oder Gesamtleistung beschreibt die Leistungsdichte im System über den Frequenzbereich von 0 - 0,4 Hz.

*Low Frequency Power (LF)* Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,04 - 0,15 Hz repräsentiert Anteile des Vegetativums, wobei der Anteil des Sympathikus überwiegen sollte.

*High Frequency Power (HF)* Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,15 – 0,4 Hz repräsentiert den Parasympathikus, wobei hier ebenfalls die Respiratorische Sinusarrhythmie eingeht. Eine niedrige HF Leistungsdichte korreliert mit Stress und Angstreaktion. Der parasympathische Einfluss ist wesentlich zur Aufrechterhaltung der Homöostase und der kardialen Gesundheit. Ein verminderter Einfluss des Parasympathikus geht mit einem erhöhten Risiko von Morbidität und Mortalität einher (91).

Das Verhältnis von Low Frequency Power (LF) zu High Frequency Power (HF) drückt die vegetative Balance von Parasympathikus und Sympathikus aus. Je höher der Wert, desto stärker ist der Einfluss des Sympathikus (92).

Zur besseren statistischen Vergleichbarkeit werden Low Frequency Power (LF) und High Frequency Power (HF) normalisiert und mit dem Index (nu) Normalized Unit versehen.

Die normalisierten Werte repräsentieren den Anteil der Leistungsdichte an der Summe der beiden Anteile aus Low Frequency Power (LF) und High Frequency Power (HF) und ihr Anteil wird in Prozent [%] ausgedrückt (92).

Tabelle 2 Faktoren der Analyse der Herzfrequenzvariabilität im Frequenzbereich

Bezeichnung	Frequenzbereich	Einheit
TP	0,00 - 0,40 Hz	Milliquadratsekunden [ms <sup>2</sup> ]
LF LFnu	0,04 – 0,15 Hz	Milliquadratsekunden [ms <sup>2</sup> ] [%]
HF HFnu	0,15 – 0,40 Hz	Milliquadratsekunden [ms <sup>2</sup> ] [%]
LF/HF	0,04 – 0,15 Hz / 0,15 – 0,40 Hz	-

## 1.5. Fragestellung

Die vorliegende Arbeit behandelt folgende Fragestellung:

**Ergeben sich langfristige Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität während einer antarktischen Überwinterungskampagne und gehen damit Veränderungen der sympathovagalen Balance als Zeichen einer stressinduzierten Anpassungsreaktion einher?**

## 2. Methoden

### 2.1. Überwinterungszyklus an der Neumayer Station III

Jedes Jahr überwintert ein Team aus mindestens neun Personen an der Neumayer Station III. Die Teams werden durch das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung, ausgewählt. Im Rahmen des Auswahl- und Vorbereitungsverfahrens erfolgen alljährlich eine umfassende ärztliche Beurteilung, das Erlernen von Sicherungstechniken in Eis und Gletschergebieten, die Brandbekämpfung, sowie Vorbereitungskurse hinsichtlich der Isolation im antarktischen Winter.



Abbildung 14 Gletscherkurs am Taschachferner Gletscher (Foto: Bernhard Gropp)



Abbildung 15 Brandbekämpfungskurs (Foto: Bernhard Gropp)

Die Teams der Überwinterung 2017 und 2018 setzten sich wie folgt zusammen:

- Arzt und Stationsleiter
- Stationsingenieur
- Elektroingenieur
- Funker bzw. Informationstechniker
- Köchin
- Meteorologe
- Luftchemikerin
- Geophysikerin I
- Geophysiker II
- Ingenieur DLR (nur 2018)
- 3 Personen BBC-Fernsehteam (nur 2017)

Nach Abschluss der Vorbereitungsphase reist die jeweilige Überwinterungscrew im Dezember an und wird vom Vorgängerteam in die Stationsabläufe und Aufgaben eingewiesen. Das Team der vorangegangenen Überwinterung verlässt die Station im Februar. Mit dem Ende der Sommerkampagne und der Abreise der letzten Gastwissenschaftlerinnen beginnt ab Ende Februar die Isolationsphase. Aufgrund der klimatischen Bedingungen ist die Station während der Wintersaison von Februar bis Oktober vollständig von der Außenwelt abgeschnitten. Während der Isolationszeit herrscht zusätzlich von Mitte Mai bis Ende Juli die 68 Tage andauernde Polarnacht. Mit der Wiederaufnahme des Flugbetriebes im November beginnt die Sommerkampagne erneut, die Isolationsphase endet und die ersten Gastwissenschaftler treffen an der Station ein.



Abbildung 16 Landebahn Flugzeug Polar 6 - Typ Basler BT-67 (Foto: Bernhard Gropp)



Abbildung 17 FS Polarstern am 28.01.2018 Ablegen von der Schelfeiskante nach Versorgung der Neumayer-Station III (Foto: Bernhard Gropp)

## 2.2. Studienablauf

Die Durchführung der dieser Arbeit zu Grunde liegenden humanphysiologischen Studie auf der Neumayer Station III wurde durch die Ethikkommission der Charité Universitätsmedizin Berlin genehmigt und erfolgte im Einklang mit den ethischen Grundsätzen der Deklaration von Helsinki (93). Nach Aufklärung und Einwilligung der Studienteilnehmenden fanden in den Jahren 2017 und 2018 umfassende Eingangsuntersuchungen und Einweisungen in die aktuellen Testverfahren statt. In den Überwinterungskampagnen 2017 und 2018 nahmen insgesamt 22 Teammitglieder teil, von denen 13 als Probanden für diese Studie gewonnen und zur Auswertung gebracht werden konnten ( $n_{2017}=5$ ,  $n_{2018}=8$ ,  $n_{\text{fem}}=3$ ,  $n_{\text{ma}}=10$ ). Es wurde während der Isolationsphase von Februar bis Oktober bei jeder Testperson monatlich ein 24 Stunden EKG aufgezeichnet. Die EKG-Aufzeichnung erfolgte mittels EKG-Recorder eMotion Faros 90° (94). Die Testpersonen folgten während der Aufzeichnung ihrem regulären Tagesablauf.

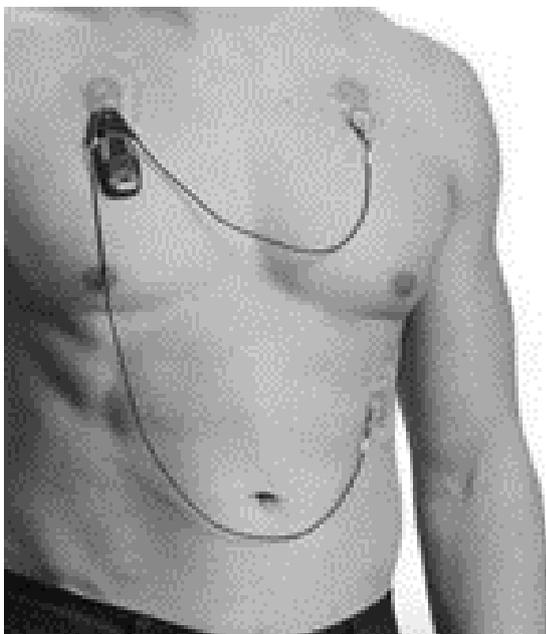


Abbildung 18 EKG Recorder eMotion Faros 90° (94)

## 2.3. Datenaufbereitung

Testpersonen mit mindestens acht auswertbaren 24h EKG-Messungen zwischen Februar und Oktober wurden in die Untersuchung eingeschlossen. Die Sichtung der aufgezeichneten Daten erfolgte mittels der HRVanalysis Software 1.2. (85). Zunächst war die Aufbereitung der Datensätze erforderlich. Hierbei wurden manuell die Intervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden R-Zacken des QRS-Komplexes markiert um im Weiteren Bewegungsartefakte, Zeiträume mit Signalverlust und Extrasystolen aus der Betrachtung auszuschließen. Nach visueller Sichtung und Korrektur aller Aufzeichnungen wurde als Auswertungsintervall ein weitgehend störungsarmer Zeitraum der zweiten Nachthälfte und frühen Morgenstunden von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr Ortszeit/UTC (UTC – koordinierte Weltzeit) festgelegt. Die mittels HRVanalysis 1.2.(85) aufgearbeiteten Daten wurden unter Anwendung der Skriptsprache R (Version 4.0.2) weitergehend prozessiert und analysiert. Die Ergebnisse der Auswertung werden in Kapitel 3 präsentiert und in Kapitel 4 in Bezug zur Fragestellung diskutiert.

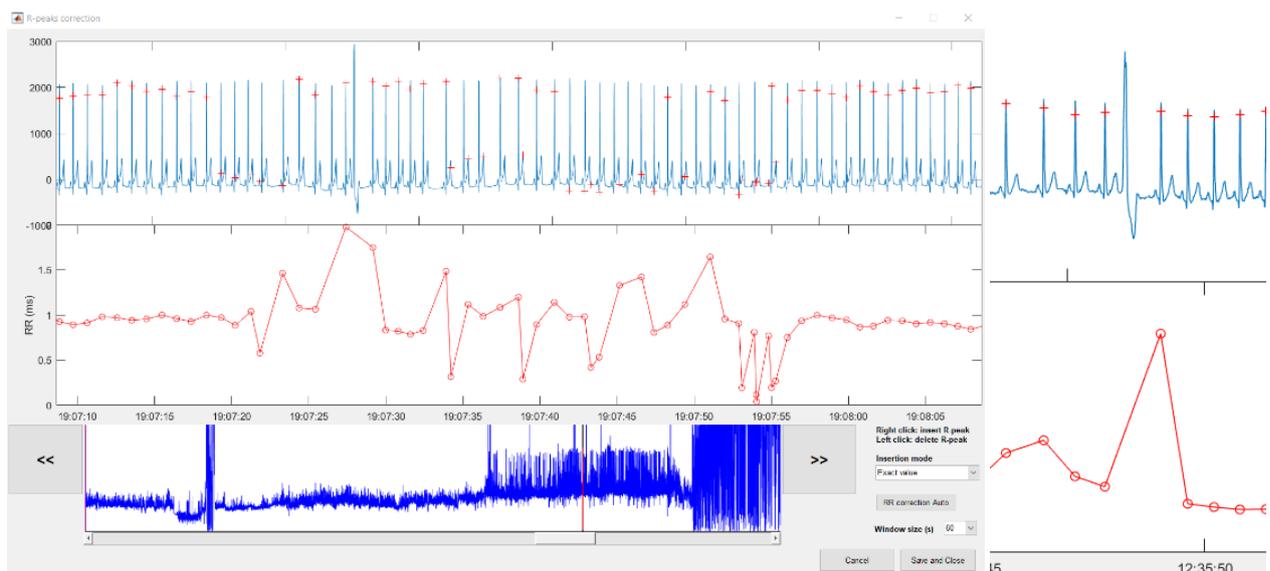


Abbildung 19 HRVanalysis 1.2. (85) EKG Darstellung Identifizierung R Zacken Ausschluss von Extrasystolen

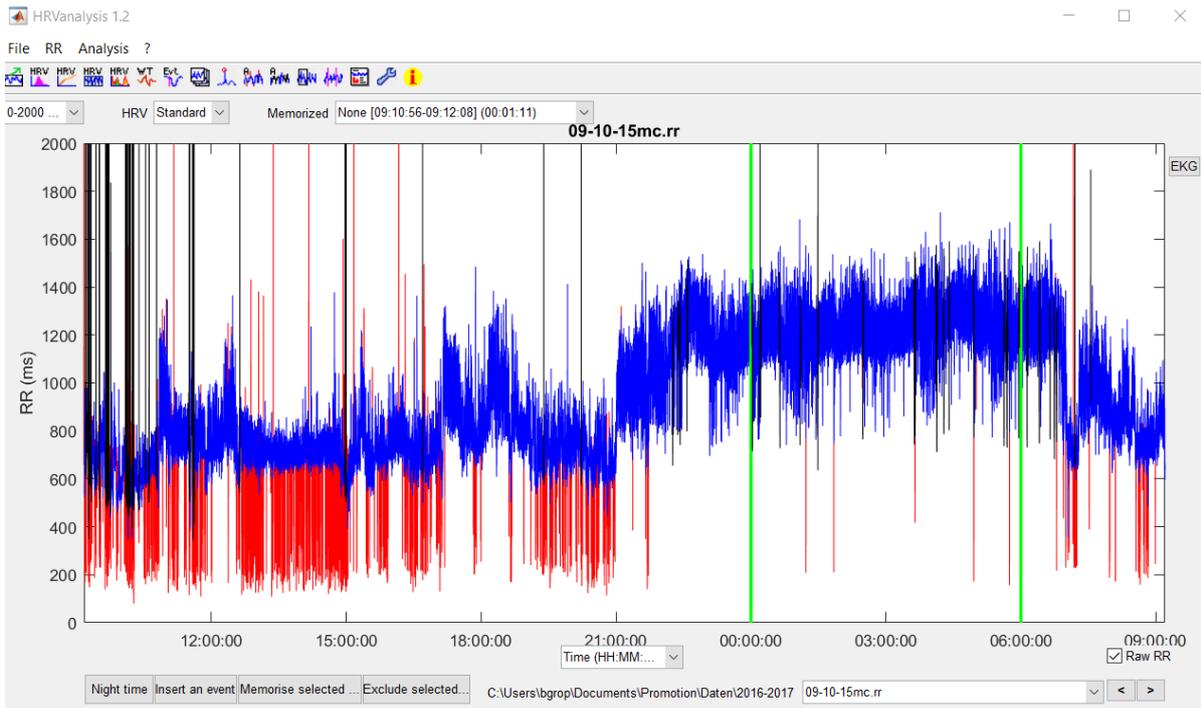


Abbildung 20 HRVAnalysis 1.2. (85) Daten und Festlegung des Auswertungszeitraumes mit wenigen Artefakten (minimale Anzahl der Markierung schwarz und rot)

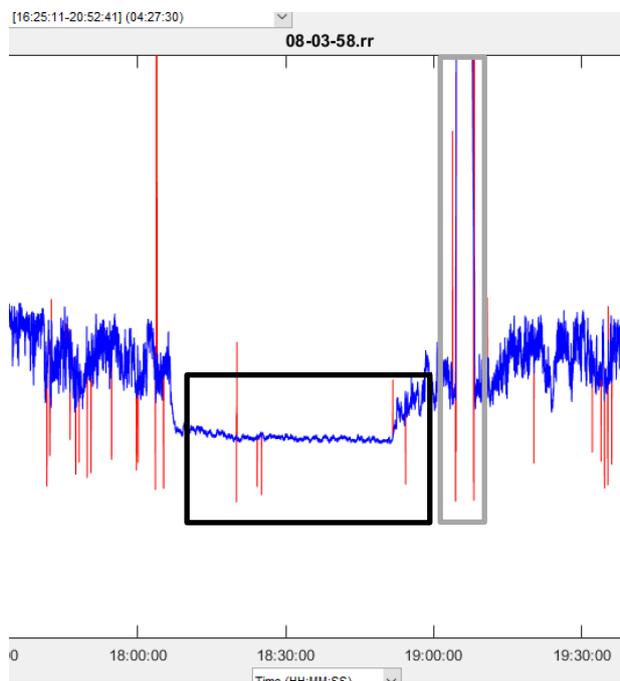


Abbildung 21 HRVAnalysis 1.2. (85) Daten mit Identifizierung einer Sportaktivitätsphase mit deutlicher Verflachung der Herzfrequenzvariabilität (schwarz umrahmt) und eine Unterbrechung der Aufzeichnung (grau umrahmt)

## 2.4. Auswertung

Mit Hilfe der Skriptsprache R (Version 4.0.2), sowie Microsoft Excel Office 365 MSO (16.0.13328.20262) erfolgte die statistische Auswertung. Die anschließende graphische Aufbereitung der Ergebnisse wurde mittels GraphPad Prism Version 9.3.0 bzw. 9.3.1 für Windows Software durchgeführt. Resultate wurden über die Zeit der Isolation aufgetragen und im Box-Whisker-Plot visualisiert. Die Auswertung der erfassten Messungen der Nachtstunden der zweiten Nachthälfte von 00:00Uhr bis 06:00Uhr Ortszeit/UTC erfolgte zunächst monatlich über die Zeit der Isolationsphase. Die weiterführende Auswertung erfolgte unter Beachtung der Lichtverhältnisse. Hierfür wurde die Isolationsphase in Tertiale unterteilt, wobei dem Tertial der Polarnacht jeweils ein Tageslichttertial voran- und nachgestellt wurde. Die Auswertung und Darstellung der Faktoren der Zeit- und Frequenzdomäne erfolgte bei kleiner Probandengruppe zunächst deskriptiv im Box-Whisker-Plot. Im dargestellten Box-Whisker-Plot liegen 50% der Daten innerhalb der Box. Der Median ist als waagerechter Strich in der Box gekennzeichnet. Begrenzt wird die Box jeweils durch das obere und untere Quartil. Die Ausdehnung der Box entspricht dem Interquartilsabstand. Die Whisker sind durch die 1,5-fache Länge des Interquartilsabstandes definiert. Werte außerhalb dieses Bereiches werden separat dargestellt (95).

Folgende Faktoren wurden ausgewertet.

NN	nächtliche Dauer einer elektrischen Herzaktion
SDNN	Standardabweichung aller NN-Intervalle in den Nachtstunden
pNN50	Prozentsatz der NN-Intervalle mit mindestens 50 Millisekunden Abweichung vom vorausgehenden NN-Intervall in den Nachtstunden
rMSSD	Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle

LF/HF        nächtliche Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,04 - 0,15 Hz (LF) geteilt durch die nächtliche Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,15 – 0,4 Hz (HF)

Zur weiterführenden vertiefenden statistischen Untersuchung aller erfassten Faktoren und der Daten der dreizehn Probanden an acht Monatsmesspunkten wurde das lme4/lmer Softwarepaket für gemischt lineare Modelle in R (Version 4.0.2) verwendet. Zunächst erfolgte die Prüfung der Daten mit Hilfe eines Shapiro-Wilk-Tests zur Klärung der Normalverteilung der kleinen Stichprobe mit wenigen Probanden. Zur weiteren Absicherung der Normalverteilung der Stichprobe kamen der Normal Q-Q Plot und der Residual vs. Fitted Plot als explorativ-grafische Werkzeuge zum Einsatz. Zur weiteren Suche nach statistischen Zusammenhängen bei sehr kleiner Stichprobe erfolgte unter Anwendung der Kenward-Roger-Approximation-Methode (96) der paarweise Vergleich einzelner Messzeitpunkte. Statistische Zusammenhänge von Monat zu Monat beziehungsweise entsprechend der Lichtperioden zueinander, sollten damit sichtbar werden. Ergänzend erfolgte eine konservative Anpassung nach Bonferroni zur weiteren Prüfung des Kontrastes zwischen einzelnen Messpunkten, um signifikante Entwicklungen zwischen jeweiligen monatlichen Messpunkten oder zwischen zwei Lichtperioden zu erkennen (97). Ziel war es, das Defizit der kleinen Stichprobe durch konservative Testverfahren hinsichtlich der Aussage zu stützen und den  $\alpha$ -Fehler durch multiple Testung auszugleichen. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf 0,05 festgelegt.

Tabellen und Abbildungen der statistischen Prüfung finden sich im Ergebnissteil.

### 3. Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse unterteilt sich in zwei Abschnitte. Im ersten Teil (Abschnitt 3.1. Seite 47) werden zur Beurteilung der untersuchten Gruppe anthropometrische Daten vorgestellt. Im zweiten Teil (Abschnitt 3.2. – 3.6.) werden die Faktoren der Zeit- und Frequenzdomäne als monatliche Auswertung der Daten der nächtlichen Herzfrequenzmessung gezeigt. Der monatlichen Auswertung wird die Darstellung nach Unterteilung der Isolationsphase in Tertiale entsprechend den Lichtperioden zur Seite gestellt.

Drei Lichtperioden der Isolationsphase bilden die Grundlage der Unterteilung.

Periode *T1*: südpolarer Herbst mit abnehmender Tageslichtdauer, umfasst die Monate Februar, März und April.

Periode *T2*: südpolarer Winter mit der mehr als 60 Tage währenden Polarnacht, umfasst die Monate Mai, Juni und Juli.

Periode *T3*: südpolares Frühjahr mit zunehmender Tageslichtdauer, umfasst die Monate August, September und Oktober.

Die untersuchten Faktoren werden deskriptiv als Box-Whisker-Plot graphisch dargestellt. Extrem abweichende Werte, die das 1,5-fache des Interquartilsabstands überschreiten, werden separat, außerhalb der Whisker dargestellt. Zusätzlich zur deskriptiven Darstellung im box-and-whisker-plot erfolgte die Prüfung der Daten mit Hilfe eines Schapiro-Wilk-Tests, die Absicherung der Normalverteilung der Stichprobe als Normal Q-Q Plot und Residual vs. Fitted Plot. Die Auswertung nach gemischtlinearen Modellen unter Anwendung der Kenward-Roger-Approximation-Methode und eine konservative Anpassung nach Bonferroni zur weiteren Prüfung des Kontrastes zwischen einzelnen Messpunkten jeweils monatlich, beziehungsweise zwischen Lichtperioden erfolgte zur vertiefenden Prüfung der gewonnenen Daten.

Die grafische Aufbereitung erfolgt als Darstellung im Liniendiagramm, die Messpunkte als Mittelwerte und 95% Konfidenzintervalle.

### 3.1. Anthropometrische Daten

Daten von zehn männlichen und drei weiblichen Teilnehmerinnen der Überwinterungskampagnen 2017 und 2018 konnten ausgewertet werden. Die Teilnehmenden waren im Median 31 Jahre alt, 180 cm groß, 80 kg schwer und wiesen einen Body Mass Index von 24,7 kg/m<sup>2</sup> auf. Eine getrennte Auswertung nach Geschlecht ist, aufgrund der insgesamt kleinen Probandengruppe mit nur drei weiblichen Probandinnen, nicht separat dargestellt.

Tabelle 3 Darstellung der anthropometrischen Daten

	Alter [Jahren]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BodyMassIndex [kg/m <sup>2</sup> ]
Mittelwert	32	177	77	24,3
Median	31	180	80	24,7
Standardabweichung	4	9	16	3,4
Minimum	24	160	52	19,3
Maximum	40	188	107	30,3

### 3.2. Auswertung der Herzfrequenzbestimmung in den Nachtstunden (NN-Intervall)

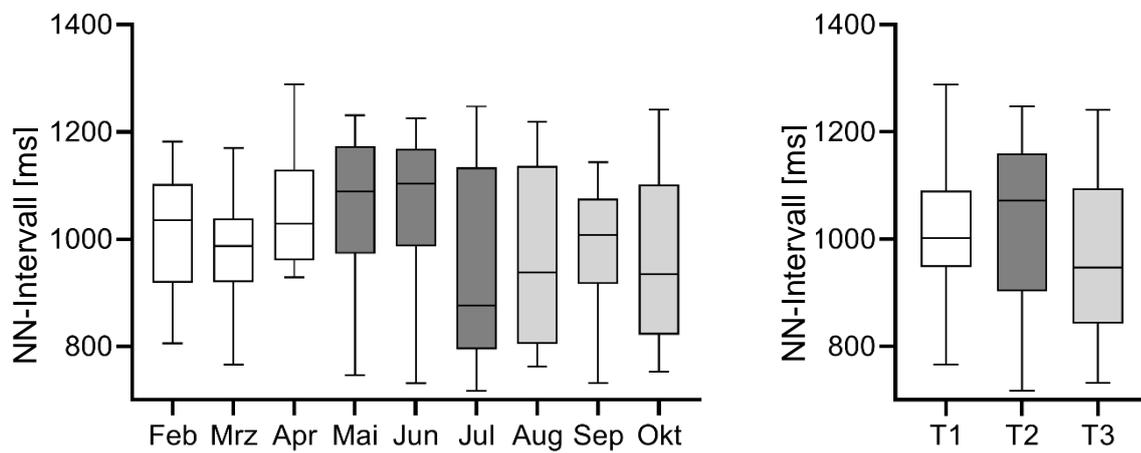


Abbildung 22 Darstellung der Dauer einer elektrischen Herzaktion (NN-Intervall) monatlich und gruppiert nach Lichtperiode [T1 Februar, März, April - weiß - T2 Südpolarnacht Mai, Juni, Juli - dunkelgrau - T3 August, September, Oktober - lichtgrau] über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Darstellung im box-and-whisker-plot Minimum Maximum bis zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands

## Auswertung NN-Intervall - gemischtlineare Modelle monatliche Messung

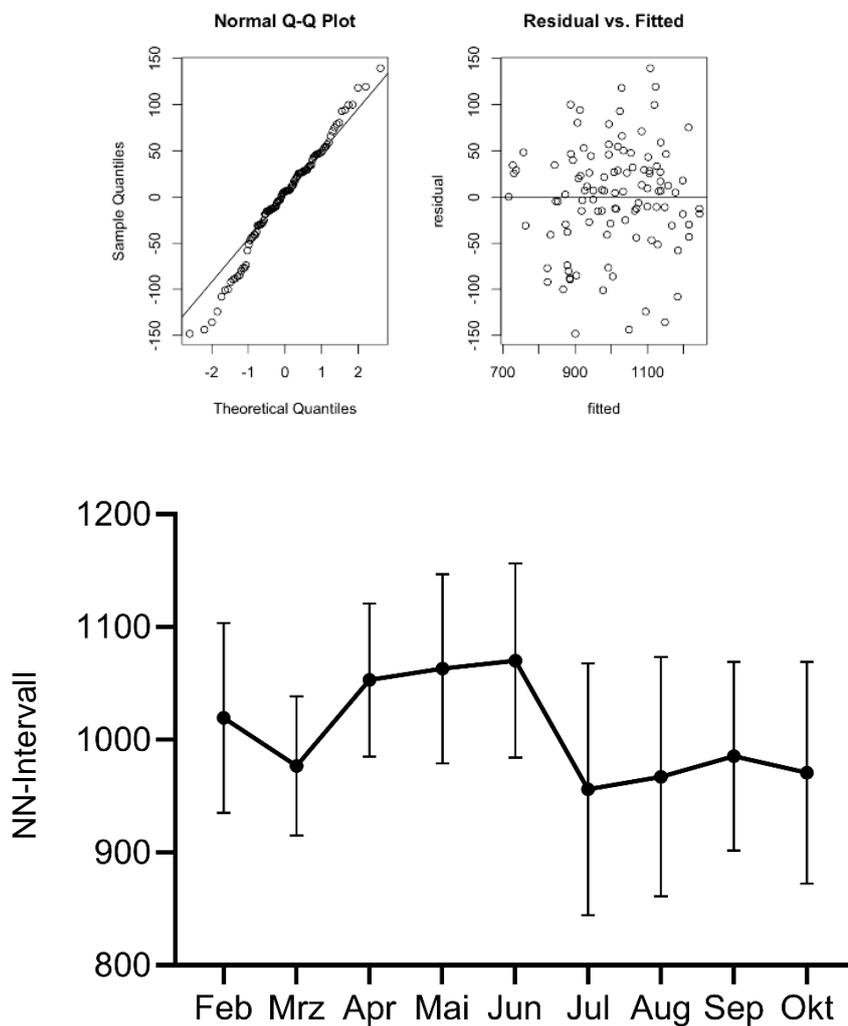


Abbildung 233 Darstellung der Dauer einer elektrischen Herzaktion (NN-Intervall) als Mittelwert und 95% KI monatlich über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 4 NN-Intervall monatlich positiver Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
p-Wert	0,7920	0,9012	0,1893	0,3949	0,0677	0,1247	0,3361	0,5938	0,5881

Tabelle 5 NN-Intervall monatlich paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
Feb - Mar	0,4587	1,0000
Feb - Apr	0,1951	1,0000
Feb - Mai	0,0166	0,5978
Feb - Jun	0,0176	0,6345
Feb - Jul	0,1368	1,0000
Feb - Aug	0,3002	1,0000
Feb - Sep	0,8384	1,0000
Feb - Okt	0,3369	1,0000
Mar - Apr	0,0308	1,0000
Mar - Mai	0,0009	0,0316
Mar - Jun	0,0011	0,0389
Mar - Jul	0,4152	1,0000
Mar - Aug	0,7226	1,0000
Mar - Sep	0,3263	1,0000
Mar - Okt	0,8114	1,0000
Apr - Mai	0,2443	1,0000
Apr - Jun	0,2492	1,0000
Apr - Jul	0,0036	0,1282
Apr - Aug	0,0166	0,5974
Apr - Sep	0,2623	1,0000
Apr - Okt	0,0172	0,6177
Mai - Jun	0,9886	1,0000
Mai - Jul	0,0001	0,0018
Mai - Aug	0,0005	0,0167
Mai - Sep	0,0241	0,8679
Mai - Okt	0,0004	0,0143
Jun - Jul	0,0001	0,0025
Jun - Aug	0,0006	0,0208
Jun - Sep	0,0264	0,9497
Jun - Okt	0,0005	0,0181
Jul - Aug	0,6728	1,0000
Jul - Sep	0,0807	1,0000
Jul - Okt	0,5638	1,0000
Aug - Sep	0,2030	1,0000
Aug - Okt	0,8983	1,0000
Sep - Okt	0,2276	1,0000

## Auswertung NN-Intervall - gemischtlineare Modelle – gruppiert nach Lichtperioden

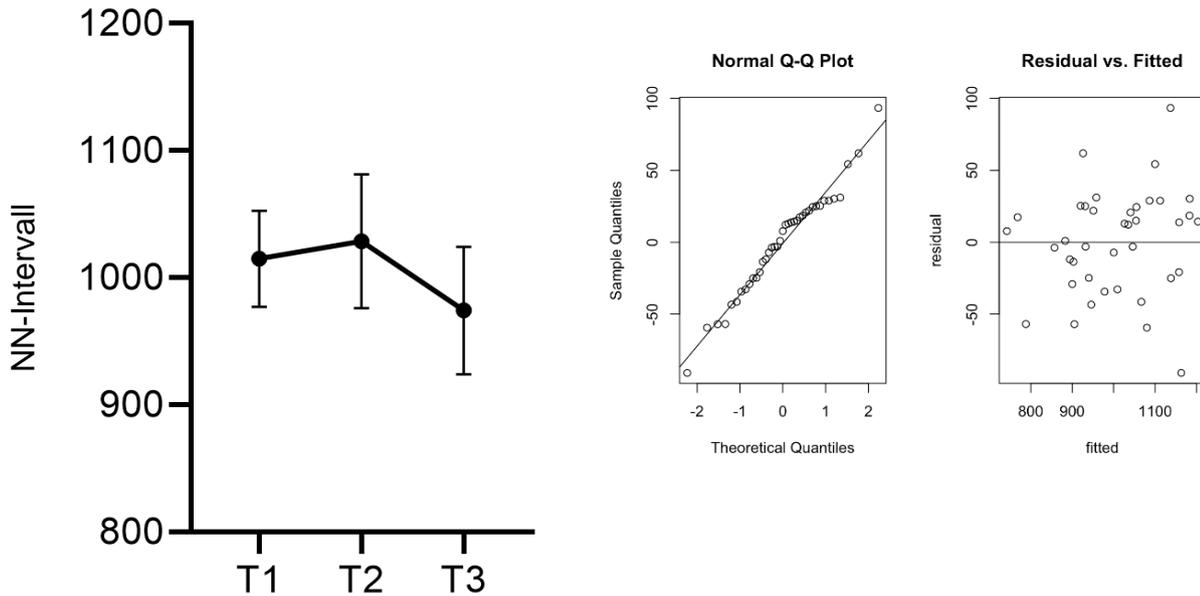


Abbildung 24 Darstellung der Dauer einer elektrischen Herzaktion (NN-Intervall) als Mittelwert und 95% KI nach Tertialen über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 6 NN-Intervall Lichtperioden positiver Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	T1	T2	T3
p-Wert	0,9308	0,5294	0,8612

Tabelle 7 NN-Intervall Lichtperioden paarweise Kontrastuntersuchung Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Tertial vs. Tertial	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
T1 T2	0,2760	0,8281
T1 T3	0,1579	0,4737
T2 T3	0,0167	0,0501

## Ergebnis Herzfrequenzbestimmung NN-Intervall

Die Dauer einer elektrischen Herzaktion nimmt zu Beginn der Isolationsphase zu und erreicht die maximale Dauer zum Höhepunkt des südpolaren Winters. Es folgt die Abnahme der Dauer einer elektrischen Herzaktion zum Ende des südpolaren Winters, diese erreicht ihr Minimum zum Ende der Dunkelphase. Es folgt eine signifikante Abnahme der Dauer des NN-Intervalls zum Ende der Isolation vom zweiten zum dritten Tertial.

Im paarweisen Kontrastvergleich zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Monaten. Eine signifikante Abnahme der Dauer einer elektrischen Herzaktion zeigt sich vom zweiten zum dritten Tertial. In der Einteilung nach Tertialen entsprechend der Lichtperioden ist diese Entwicklung nach konservativer Korrektur nach Bonferroni signifikant.

### 3.3. Auswertung der nächtlichen SDNN

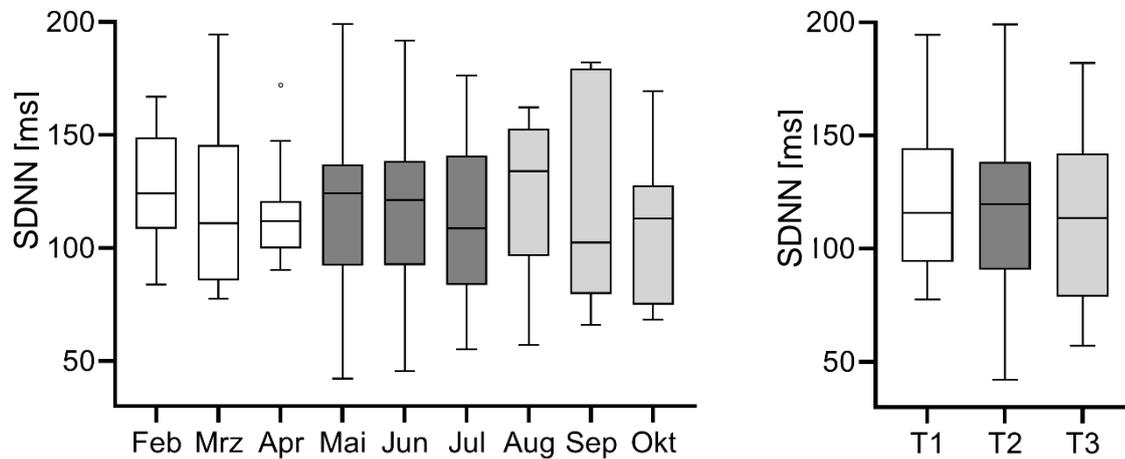


Abbildung 25 Darstellung der Standardabweichung aller NN-Intervalle monatlich und gruppiert nach Lichtperiode [T1 Februar, März, April - weiß - T2 Südpolarnacht Mai, Juni, Juli - dunkelgrau - T3 August, September, Oktober - lichtgrau] über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Darstellung im box-and-whisker-plot Minimum Maximum bis zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands

## Auswertung SDNN - gemischtlineare Modelle - monatliche Messung

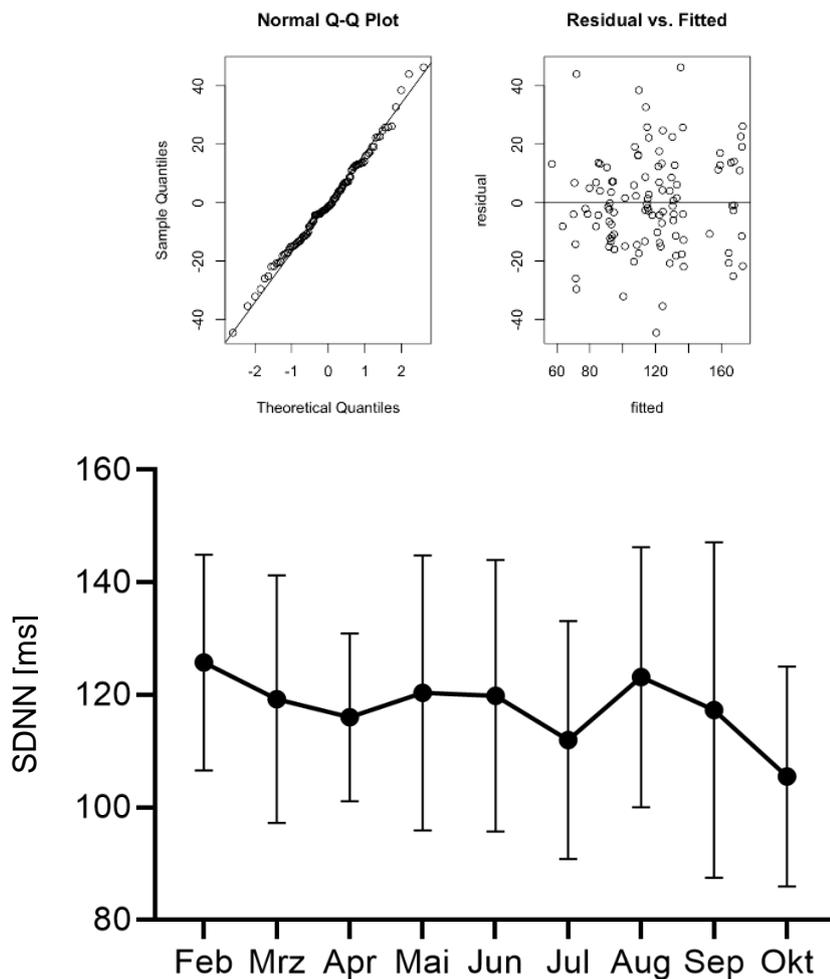


Abbildung 26 Darstellung der Standardabweichung der Dauer des Zeitintervall zwischen zwei Herzaktionen als Mittelwert und 95% KI monatlich über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 8 SDNN monatlich Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ . Für den Monat September kann im Shapiro Wilk Test keine Normalverteilung gezeigt werden.

Shapiro-Wilk-Test	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
p-Wert	0,7547	0,3085	0,0623	0,5970	0,9911	0,9136	0,3737	0,0438	0,1549

Tabelle 9 SDNN monatlich paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
Feb - Mar	0,8758	1,0000
Feb - Apr	0,2824	1,0000
Feb - Mai	0,9921	1,0000
Feb - Jun	0,9529	1,0000
Feb - Jul	0,2720	1,0000
Feb - Aug	0,9411	1,0000
Feb - Sep	0,8196	1,0000
Feb - Okt	0,0545	1,0000
Mar - Apr	0,3193	1,0000
Mar - Mai	0,8742	1,0000
Mar - Jun	0,9189	1,0000
Mar - Jul	0,3077	1,0000
Mar - Aug	0,9351	1,0000
Mar - Sep	0,9325	1,0000
Mar - Okt	0,0559	1,0000
Apr - Mai	0,2505	1,0000
Apr - Jun	0,2835	1,0000
Apr - Jul	0,9991	1,0000
Apr - Aug	0,3034	1,0000
Apr - Sep	0,3855	1,0000
Apr - Okt	0,3747	1,0000
Mai - Jun	0,9578	1,0000
Mai - Jul	0,2393	1,0000
Mai - Aug	0,9447	1,0000
Mai - Sep	0,8139	1,0000
Mai - Okt	0,0389	1,0000
Jun - Jul	0,2724	1,0000
Jun - Aug	0,9861	1,0000
Jun - Sep	0,8572	1,0000
Jun - Okt	0,0491	1,0000
Jul - Aug	0,2925	1,0000
Jul - Sep	0,3747	1,0000
Jul - Okt	0,3644	1,0000
Aug - Sep	0,8740	1,0000
Aug - Okt	0,0572	1,0000
Sep - Okt	0,0818	1,0000

## Auswertung SDNN - gemischtlineare Modelle – gruppiert nach Lichtperioden

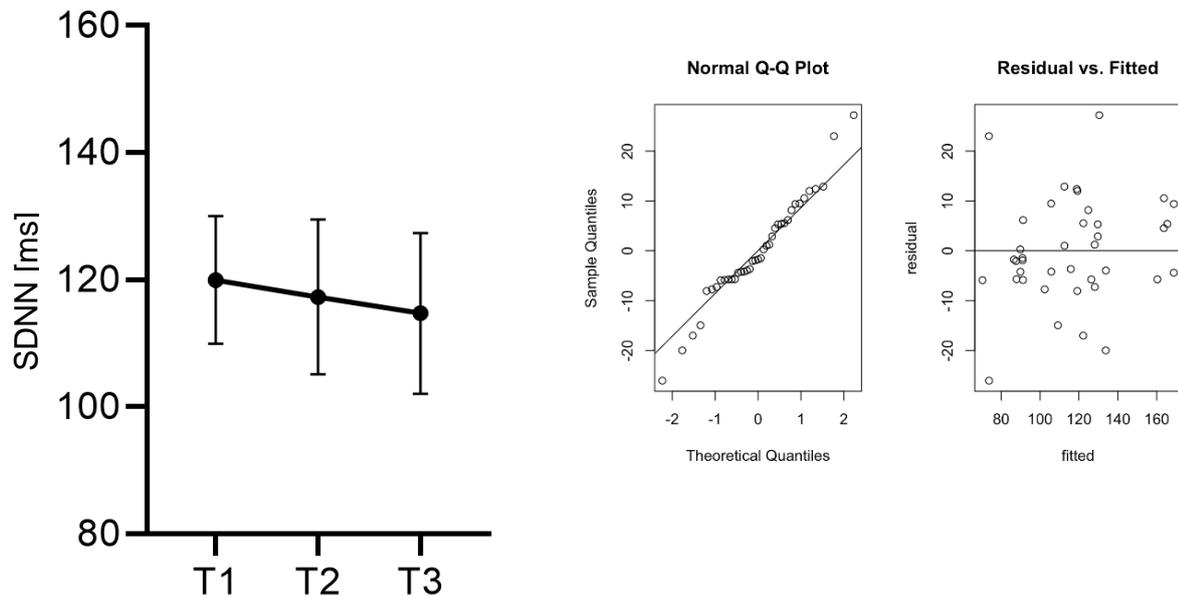


Abbildung 27 Darstellung der Standardabweichung der Dauer des Zeitintervalls zwischen zwei Herzaktionen als Mittelwert und 95% KI nach Tertialen über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 10 SDNN Lichtperiode Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	T1	T2	T3
p-Wert	0,2154	0,6793	0,5342

Tabelle 11 SDNN Lichtperiode paarweise Kontrastuntersuchung Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Tertial vs Tertial	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
T1 T2	0,9918	1,0000
T1 T3	0,5256	1,0000
T2 T3	0,5191	1,0000

## Ergebnis SDNN

Eine deutliche Veränderung der nächtlichen Standardabweichung aller NN-Intervalle (SDNN) zeigt sich weder in der monatlichen noch in der Auswertung nach Gruppierung der Daten hinsichtlich der Lichtperioden. Einzelne Probanden unterschreiten in der Dunkelphase des südpolaren Winters die kritische Marke von 50 ms - sie weisen damit ein erhöhtes Morbiditätsrisiko auf.

Die paarweise Kontrastuntersuchung weist schwach auf eine Abnahme der SDNN zum Ende der Isolationsphase im beginnenden südpolaren Sommer hin.

### 3.4. Auswertung des nächtlichen pNN50

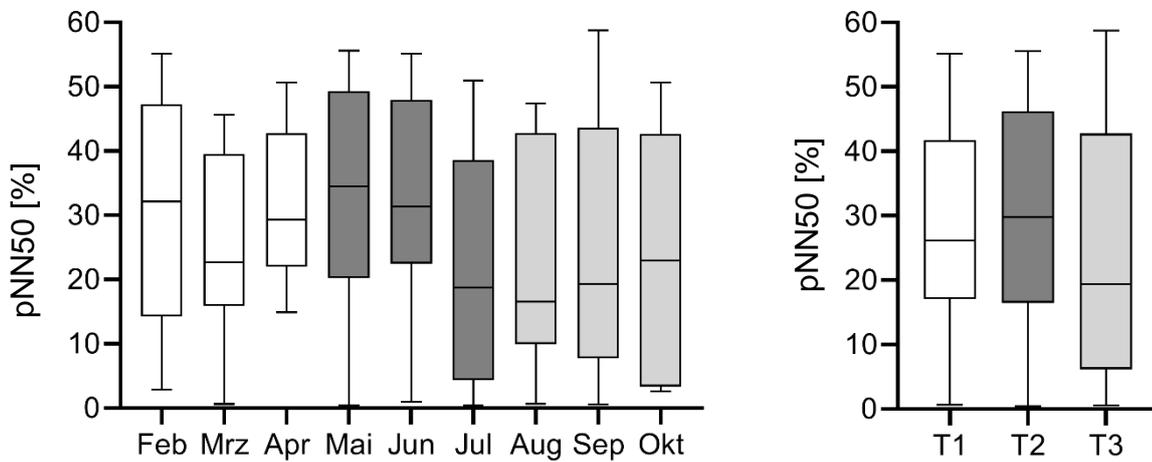


Abbildung 288 Darstellung des Prozentsatzes der NN-Intervalle mit mindestens 50 Millisekunden Abweichung vom vorausgehenden NN-Intervall (pNN50) monatlich und gruppiert nach Lichtperiode [T1 Februar, März, April - weiß - T2 Südpolarnacht Mai, Juni, Juli - dunkelgrau - T3 August, September, Oktober - lichtgrau] über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Darstellung im box-and-whisker-plot Minimum Maximum bis zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands

## Auswertung pNN50 - gemischtlineare Modelle - monatliche Messung

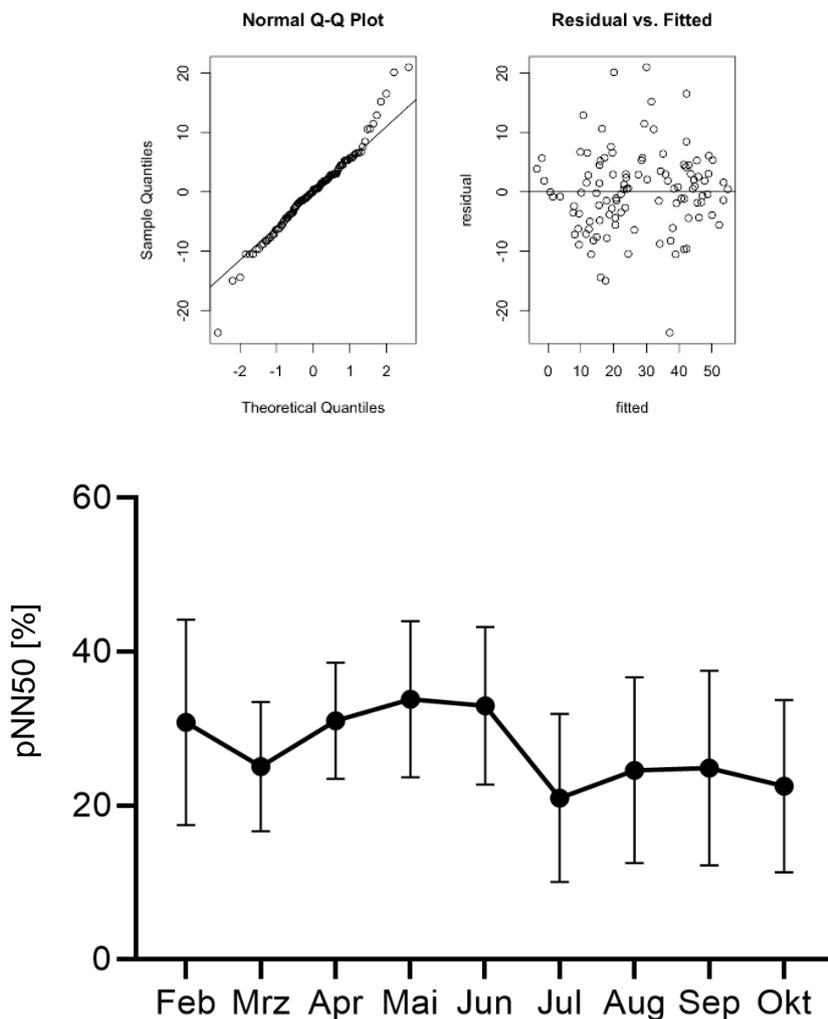


Abbildung 29 Darstellung des prozentualen Anteiles der Intervalle mit mindestens 50 ms Abweichung vom vorausgehenden Intervall - pNN50 als Mittelwert und 95% KI monatlich über den Überwintungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung für einen Großteil der Messwerte, jedoch mit Abweichungen in den Randbereichen. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 12 pNN50 monatlich Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
p-Wert	0,2160	0,7275	0,3074	0,6703	0,7958	0,1228	0,0519	0,5180	0,0547

Tabelle 13 pNN50 monatlich paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
Feb - Mar	0,3548	1,0000
Feb - Apr	0,7838	1,0000
Feb - Mai	0,0800	1,0000
Feb - Jun	0,1794	1,0000
Feb - Jul	0,0314	1,0000
Feb - Aug	0,1537	1,0000
Feb - Sep	0,5054	1,0000
Feb - Okt	0,0895	1,0000
Mar - Apr	0,2038	1,0000
Mar - Mai	0,0044	0,1596
Mar - Jun	0,0169	0,6100
Mar - Jul	0,1775	1,0000
Mar - Aug	0,5553	1,0000
Mar - Sep	0,8126	1,0000
Mar - Okt	0,3970	1,0000
Apr - Mai	0,1188	1,0000
Apr - Jun	0,2619	1,0000
Apr - Jul	0,0107	0,3847
Apr - Aug	0,0752	1,0000
Apr - Sep	0,3257	1,0000
Apr - Okt	0,0375	1,0000
Mai - Jun	0,6755	1,0000
Mai - Jul	<0,0001	0,0017
Mai - Aug	0,0011	0,0397
Mai - Sep	0,0127	0,4565
Mai - Okt	0,0003	0,0106
Jun - Jul	0,0003	0,0109
Jun - Aug	0,0047	0,1696
Jun - Sep	0,0396	1,0000
Jun - Okt	0,0016	0,0561
Jul - Aug	0,4841	1,0000
Jul - Sep	0,1290	1,0000
Jul - Okt	0,6126	1,0000
Aug - Sep	0,4302	1,0000
Aug - Okt	0,8275	1,0000
Sep - Okt	0,2973	1,0000

## Auswertung pNN50 - gemischtlineare Modelle – gruppiert nach Lichtperioden

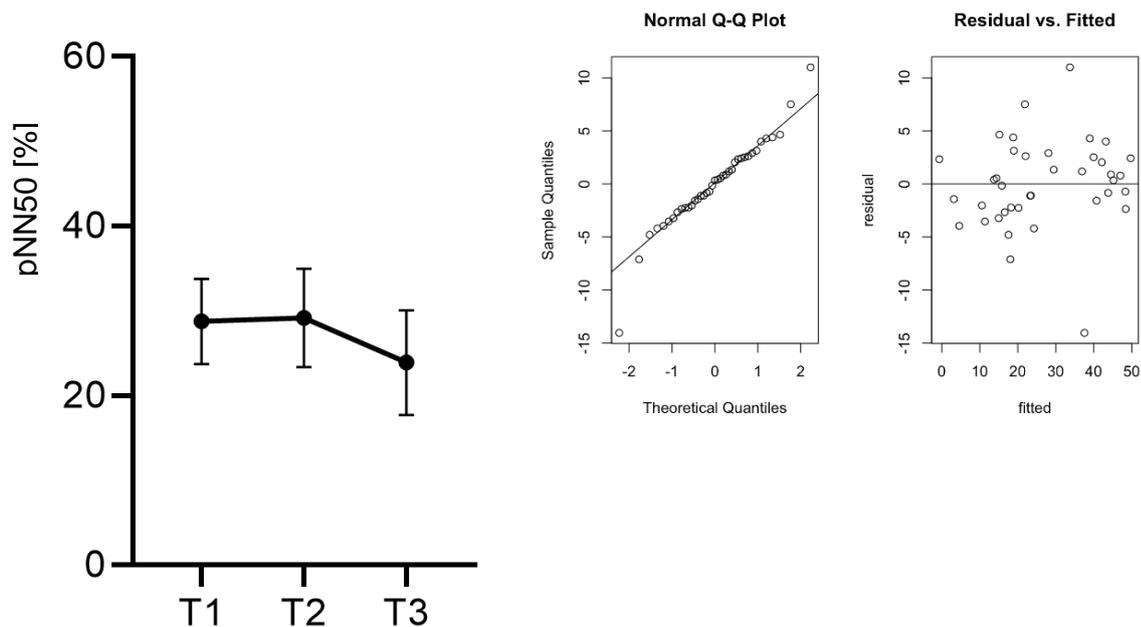


Abbildung 30 Darstellung des prozentualen Anteiles der Intervalle mit mindestens 50 ms Abweichung vom vorausgehenden Intervall - pNN50 als Mittelwert und 95% KI nach Tertialen über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 14 pNN50 Lichtperiode Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ . Für das dritte Tertial zeigt sich im Test keine bestätigte Normalverteilung.

Shapiro-Wilk-Test	T1	T2	T3
p-Wert	0,7749	0,3005	0,0279

Tabelle 15 pNN50 Lichtperiode paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Tertial vs. Tertial	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
T1 T2	0,5016	1,0000
T1 T3	0,0736	0,2209
T2 T3	0,0175	0,0524

## Ergebnis pNN50

Der nächtliche prozentuale Anteil der Intervalle mit mindestens 50 ms Abweichung vom vorausgehenden Intervall (pNN50) nimmt zu Beginn der Isolationsphase zu, erreicht den maximalen Wert zum Höhepunkt des südpolaren Winters, worauf wiederum die Abnahme des nächtlichen pNN50 zum Ende der Isolation im beginnenden südpolaren Sommer folgt. Die geringsten Werte werden im Juli und August erfasst.

In der Einteilung nach Lichtperioden zeigt sich nach einem minimalen Anstieg vom ersten zum zweiten Tertial die signifikante Abnahme zum dritten Tertial.

Im paarweisen Kontrastvergleich zeigt sich nach Bonferronikorrektur weiterhin die signifikante Abnahme vom zweiten zum dritten Tertial.

### 3.5. Auswertung des Wertes der nächtlichen rMSSD

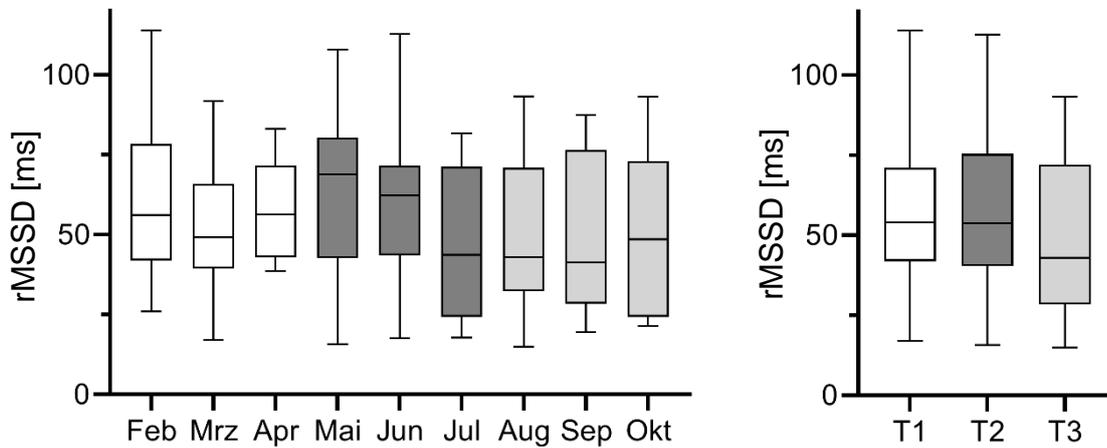


Abbildung 31 Darstellung der Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle monatlich und gruppiert nach Lichtperiode [T1 Februar, März, April - weiß - T2 Südpolarnacht Mai, Juni, Juli - dunkelgrau - T3 August, September, Oktober - lichtgrau] über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Darstellung im box-and-whisker-plot Minimum Maximum bis zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands

## Auswertung rMSSD - gemischtlineare Modelle - monatliche Messung

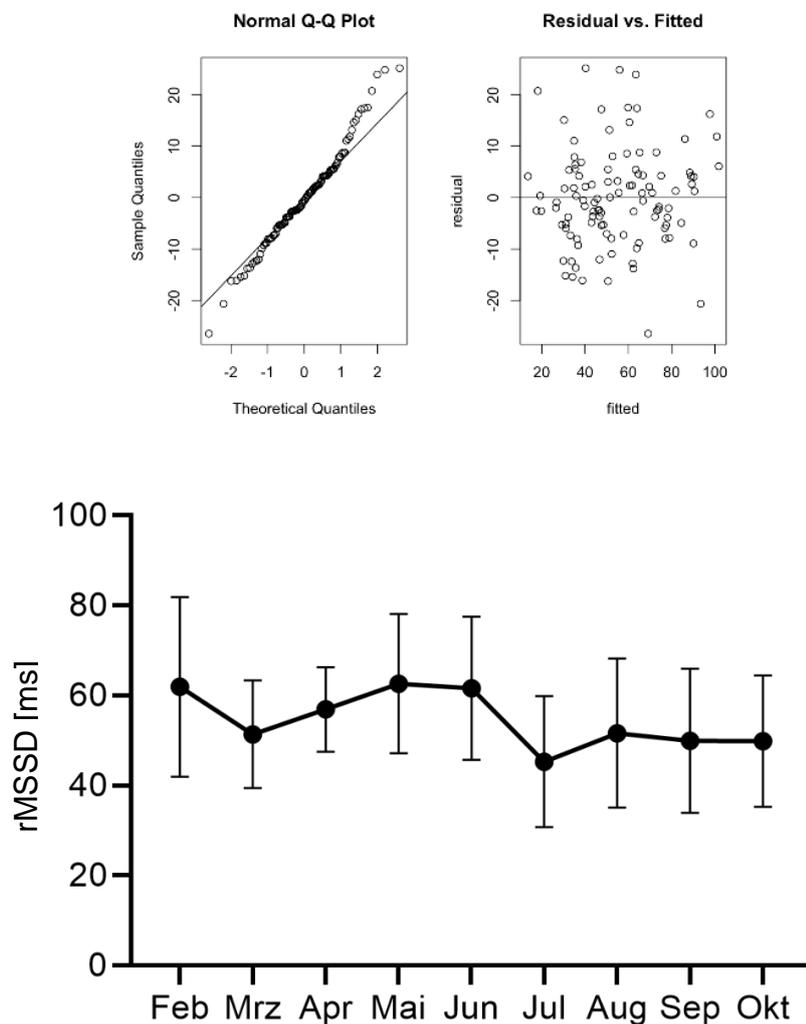


Abbildung 29 Darstellung der Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle als Mittelwert und 95% KI monatlich über den Überwintungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung für einen Großteil der Messwerte, jedoch mit Abweichungen in den Randbereichen. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 16 rMSSD monatlich Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
p-Wert	0,3341	0,9933	0,2312	0,8382	0,9464	0,0676	0,7127	0,1950	0,2386

Tabelle 17 rMSSD monatlich paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate mittels Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
Feb - Mar	0,1117	1,0000
Feb - Apr	0,3484	1,0000
Feb - Mai	0,3622	1,0000
Feb - Jun	0,4869	1,0000
Feb - Jul	0,0038	0,1380
Feb - Aug	0,0490	1,0000
Feb - Sep	0,1069	1,0000
Feb - Okt	0,0545	1,0000
Mar - Apr	0,4979	1,0000
Mar - Mai	0,0077	0,2775
Mar - Jun	0,0164	0,5917
Mar - Jul	0,1437	1,0000
Mar - Aug	0,6210	1,0000
Mar - Sep	0,9207	1,0000
Mar - Okt	0,7123	1,0000
Apr - Mai	0,0502	1,0000
Apr - Jun	0,0877	1,0000
Apr - Jul	0,0366	1,0000
Apr - Aug	0,2596	1,0000
Apr - Sep	0,4572	1,0000
Apr - Okt	0,3002	1,0000
Mai - Jun	0,8272	1,0000
Mai - Jul	0,0001	0,0023
Mai - Aug	0,0027	0,0954
Mai - Sep	0,0084	0,3013
Mai - Okt	0,0026	0,0944
Jun - Jul	0,0002	0,0071
Jun - Aug	0,0060	0,2151
Jun - Sep	0,0171	0,6165
Jun - Okt	0,0062	0,2215
Jul - Aug	0,3657	1,0000
Jul - Sep	0,1951	1,0000
Jul - Okt	0,2719	1,0000
Aug - Sep	0,7061	1,0000
Aug - Okt	0,8860	1,0000
Sep - Okt	0,8013	1,0000

## Auswertung rMSSD - gemischtlineare Modelle - gruppiert nach Lichtperioden

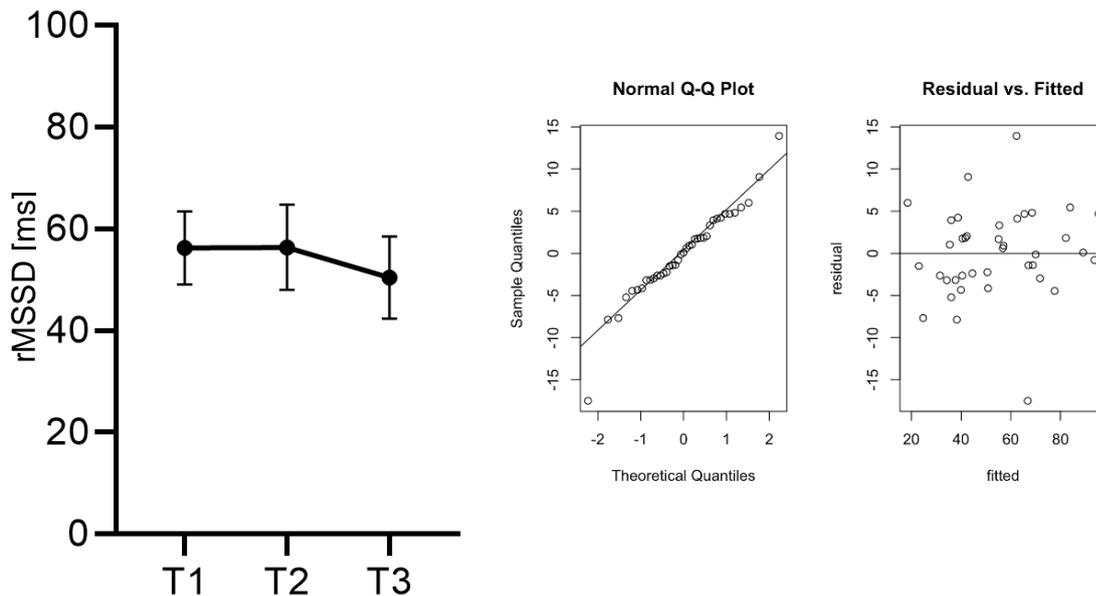


Abbildung 30 Darstellung der Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle als Mittelwert und 95% KI nach Tertialen über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 18 rMSSD Lichtperiode Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	T1	T2	T3
p-Wert	0,9437	0,9286	0,0865

Tabelle 19 rMSSD Lichtperiode paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate Freiheitsgradmethode nach Kenward und Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Tertial vs. Tertial	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
T1 T2	0,5111	1,000
T1 T3	0,0935	0,2806
T2 T3	0,0238	0,0714

## Ergebnis rMSSD

Der Wert rMSSD (Root Mean Square of Successive Differences) nimmt zu Beginn der Isolationsphase zu und erreicht den Maximalwert zum Höhepunkt des südpolaren Winters. Es folgt wiederum die rasche Abnahme des Wertes zum Ende der Dunkelperiode, um sich dann im beginnenden südpolaren Sommer auf niedrigerem Niveau einzustellen.

Unter Korrektur nach Bonferroni wird der beschriebene Verlauf im paarweisen monatlichen Kontrastvergleich besonders im Kontrast von Mai zu Juli signifikant.

Der Wert rMSSD steigt in der Gruppierung nach Lichtperioden vom ersten zum zweiten Tertial minimal an. Es folgt wiederum die Abnahme vom zweiten zum dritten Tertial. Im paarweisen Kontrastvergleich ohne konservative Korrektur nach Bonferroni wird Signifikanz in der Abnahme vom zweiten zum dritten Tertial erreicht.

### 3.6. Auswertung des nächtlichen Quotienten LF/HF

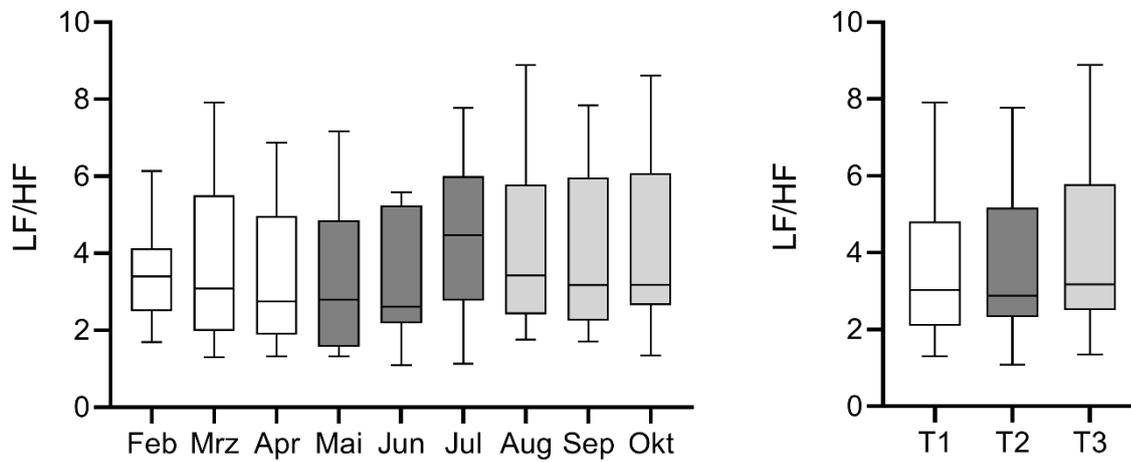


Abbildung 31 Darstellung des Quotienten (LF/HF) monatlich und gruppiert nach Lichtperiode [T1 Februar, März, April - weiß - T2 Südpolarnacht Mai, Juni, Juli - dunkelgrau - T3 August, September, Oktober - lichtgrau] über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Darstellung im box-and-whisker-plot Minimum Maximum bis zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands

# Auswertung LF/HF - gemischtlineare Modelle - monatliche Messung

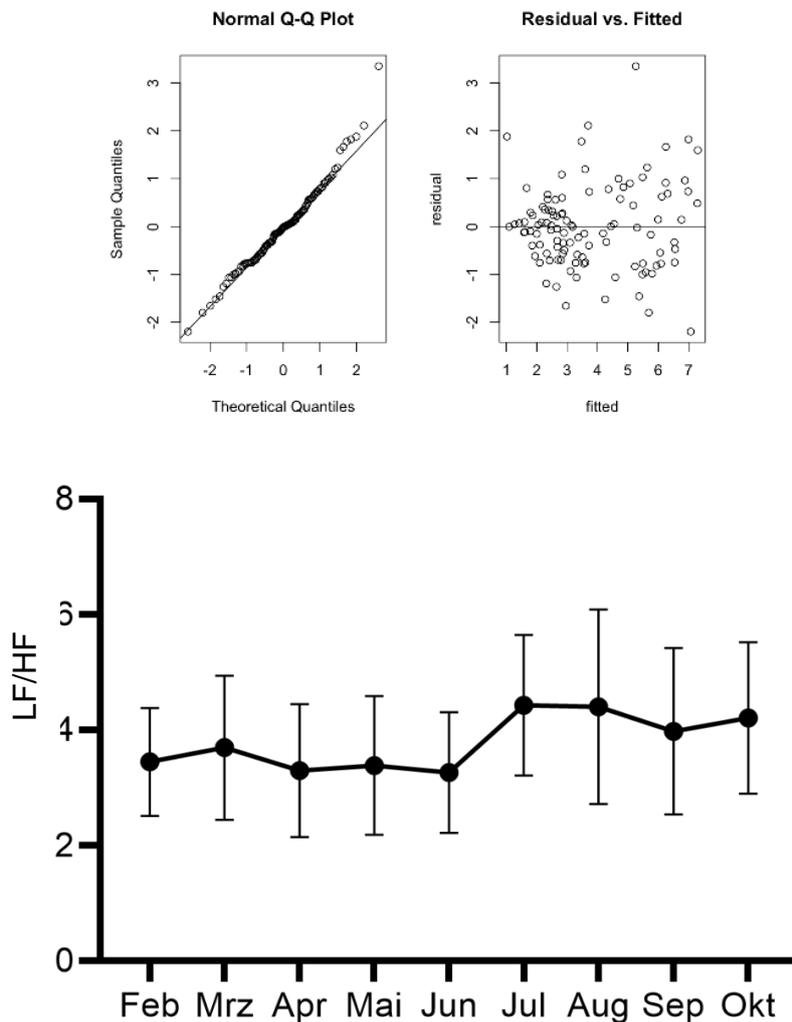


Abbildung 32 Darstellung des Quotienten (LF/HF) als Mittelwert und 95% KI monatlich über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 20 LF/HF monatlich Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ . Für die Monate Juni, August und September kann im Shapiro Wilk Test keine Normalverteilung gezeigt werden.

Shapiro-Wilk-Test	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
p-Wert	0,5778	0,2107	0,1540	0,0876	0,0393	0,5448	0,0507	0,0453	0,1825

Tabelle 21 LF/HF monatlich paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate mittels Freiheitsgradmethode nach Kenward Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
Feb - Mar	0,1742	1,0000
Feb - Apr	0,3395	1,0000
Feb - Mai	0,5406	1,0000
Feb - Jun	0,8675	1,0000
Feb - Jul	0,0022	0,0798
Feb - Aug	0,0031	0,1118
Feb - Sep	0,0425	1,0000
Feb - Okt	0,0104	0,3737
Mar - Apr	0,6818	1,0000
Mar - Mai	0,4161	1,0000
Mar - Jun	0,2081	1,0000
Mar - Jul	0,0571	1,0000
Mar - Aug	0,0654	1,0000
Mar - Sep	0,4221	1,0000
Mar - Okt	0,1801	1,0000
Apr - Mai	0,6995	1,0000
Apr - Jun	0,4044	1,0000
Apr - Jul	0,0241	0,8668
Apr - Aug	0,0291	1,0000
Apr - Sep	0,2405	1,0000
Apr - Okt	0,0868	1,0000
Mai - Jun	0,6397	1,0000
Mai - Jul	0,0073	0,2644
Mai - Aug	0,0097	0,3497
Mai - Sep	0,1166	1,0000
Mai - Okt	0,0328	1,0000
Jun - Jul	0,0022	0,0801
Jun - Aug	0,0032	0,1144
Jun - Sep	0,0488	1,0000
Jun - Okt	0,0113	0,4067
Jul - Aug	0,9768	1,0000
Jul - Sep	0,3058	1,0000
Jul - Okt	0,5656	1,0000
Aug - Sep	0,3146	1,0000
Aug - Okt	0,5644	1,0000
Sep - Okt	0,6320	1,0000

## Auswertung LF/HF - gemischtlineare Modelle - gruppiert nach Lichtperioden

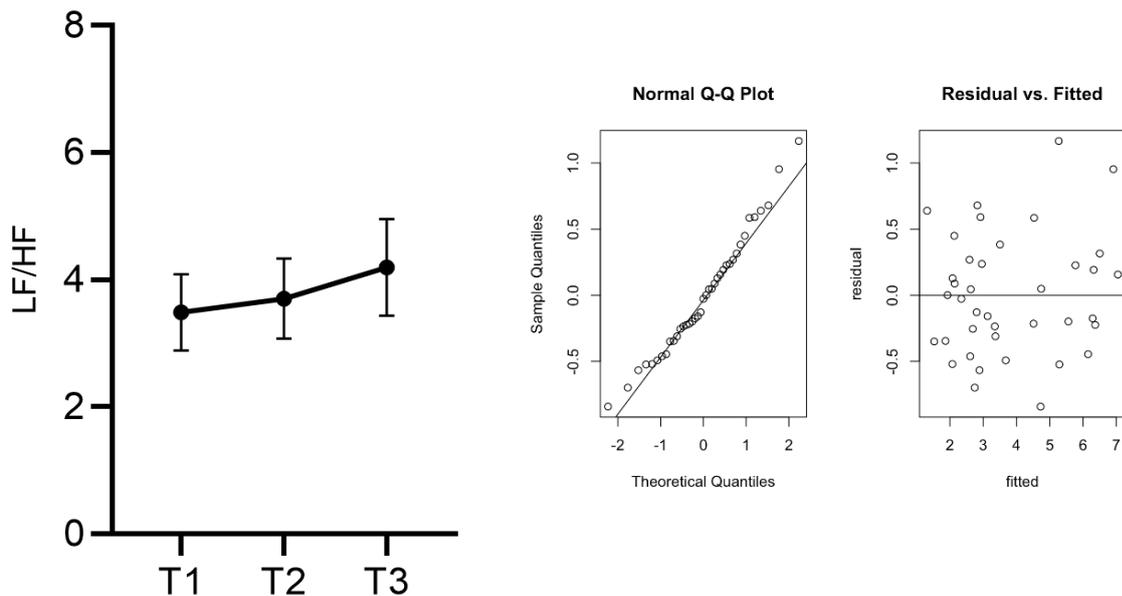


Abbildung 33 Darstellung des Quotienten (LF/HF) als Mittelwert und 95% KI nach Tertialen über den Überwinterungszeitraum 2017 und 2018. Normal Q-Q Plot und zur optischen Beurteilung der Normalverteilung. Residual vs. Fitted Plot ohne Hinweis auf nicht-lineare Zusammenhänge.

Tabelle 22 LF/HF Lichtperiode Test auf Normalverteilung für kleine Stichproben  $p > 0,05$ .

Shapiro-Wilk-Test	T1	T2	T3
p-Wert	0,0804	0,2763	0,1076

Tabelle 23 LF/HF Lichtperiode paarweise Kontrastuntersuchung der Untersuchungsmonate mittels Freiheitsgradmethode nach Kenward und Roger (p-Wert) zusätzlich konservativ korrigiert nach Bonferroni (p-Wert adjustiert). Signifikanz  $p < 0,05$ .

Monat vs. Monat	p-Wert	p-Wert adjustiert n. Bonferroni
T1 T2	0,3493	1,0000
T1 T3	0,0024	0,0072
T2 T3	0,0225	0,0676

## Ergebnis Quotient LF/HF

Der Quotient (LF/HF) aus Leistung der Frequenzkomponenten im Bereich 0,04 – 0,15 Hz geteilt durch die Leistung von Frequenzkomponenten 0,15 – 0,40 Hz erreicht den maximalen Wert zum Ende des südpolaren Winters und verbleibt auf einem höheren Niveau im Vergleich zum Beginn der Isolationsphase.

Der Quotient (LF/HF) steigt in der Einteilung nach Lichtperioden vom ersten über das zweite bis zum dritten Tertial. Im paarweisen Kontrastvergleich nach Kenward Roger und Bonferroni Korrektur erreicht der Wert einen signifikanten Anstieg vom ersten zum dritten Tertial.

## 4. Diskussion

Diese Arbeit befasst sich mit Veränderungen der nächtlichen Regulation des autonomen Nervensystems in langanhaltenden Extremsituationen. Zur Beurteilung der veränderten autonomen Regulation diente die Erfassung und Auswertung der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität während der Isolationsphase der antarktischen Überwinterungen 2017 und 2018. Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Ergebnisse auf Basis der beschriebenen Methodik zur Datenaufarbeitung und -verarbeitung vorgestellt. Es konnten Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität, sowie abgeleiteter Faktoren beobachtet werden. Im Folgenden wird die Fragestellung anhand der vorliegenden Ergebnisse beantwortet und diskutiert.

### 4.1. Beurteilung der Ergebnisse zur Fragestellung

**Ergeben sich langfristige Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität während einer antarktischen Überwinterungskampagne und gehen damit Veränderungen der sympathovagalen Balance als Zeichen einer stressinduzierten Anpassungsreaktion einher?**

Die Fragestellung vereint drei Aspekte, welche im Folgenden erläutert werden.

- Ändern sich die nächtliche Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität und die hiervon abgeleiteten Faktoren im Verlauf der Isolationsphase?
- Handelt es sich um eine mögliche Stressreaktion?
- Verändert sich die sympathovagale Balance und erfolgt dies im Speziellen zu Lasten des parasympathischen Einflusses auf die autonome Regulation? (98)

Die Dauer einer elektrischen Herzaktion sank signifikant vom zweiten zum dritten Tertial der Isolationsdauer (Seite 48-52). Der Minimalwert wurde zum Ende der Dunkelphase erreicht. Auch tierexperimentelle Versuche lieferten Hinweise auf diese Entwicklung unter Isolationsbedingungen (99). Die am schlafenden menschlichen Probanden während antarktischer Langzeitisolation erhobenen EKG Daten sind aktuell einzigartig, da in vorangegangenen Studien die Herzfrequenz mittels fünfminütiger Kurzzeitmessung am wachen Probanden keine Veränderungen zeigte (12,100–102). Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität ließen sich sowohl in der Zeit- als auch in der Frequenzdomänenbewertung erkennen. Im Bereich der Zeitdomäne zeigte pNN50 eine deutliche Entwicklung. Der pNN50-Anteil sank vom zweiten zum dritten Tertial und zeigt damit - in Übereinstimmung mit etablierten Untersuchungen - Zeichen einer Stressanpassungsreaktion der Probanden (103,104). Als Marker der Parasympathikusaktivität und Regenerationsfähigkeit zeigte pNN50, dass die Probanden eine Stressreaktion erleben (104) und die Parasympathikusaktivität zu Gunsten des Sympathikuseinflusses zum Ende des südpolaren Winters abnahm. Der Minimalwert wurde im Juli und August erreicht. Diese Veränderung erreichte im paarweisen Kontrastvergleich nach Kenward Roger vom zweiten Tertial zum dritten Tertial Signifikanz  $p < 0,05$  (Seite 58-62). Der ebenfalls in der Zeitdomäne ausgewertete Faktor rMSSD als weiterer robuster Marker der Parasympathikusaktivität und Regenerationsfähigkeit zeigte eine zu pNN50 vergleichbare Entwicklung. Der rMSSD sank vom zweiten zum dritten Tertial und stützt somit die Vermutung, dass die Probanden eine Stressanpassungsreaktion erlebten (104). Diese Veränderung erreichte analog im paarweisen Kontrastvergleich nach Kenward Roger vom zweiten Tertial zum dritten Tertial Signifikanz  $p < 0,05$  (Seite 63-67). Die Standardabweichung der NN-Intervalle SDNN veränderte sich im Mittel nicht signifikant (Seite 53-57). Bei umfassender Betrachtung zeigte

sich jedoch eine weite Spreizung der Werte während der Dunkelphase im südpolaren Winter. Einzelne Probanden unterschritten in dieser Phase den kritischen Wert von 50ms, der im Rahmen der klinischen Risikobewertung von Herz-Kreislaufkrankungen mit einem erhöhten Risiko für Morbidität und Mortalität verbunden ist (13,88). Die Auswertung in der Frequenzdomäne zeigte, dass der niedrigfrequente Anteil 0,04 – 0,15 Hz *Low Frequency LFnu* der normalisierten Leistung vom ersten zum dritten Tertial stieg und entsprechend mit einem Absinken des höherfrequenten Anteils 0,15 – 0,4 Hz *High Frequency HFnu* der normalisierten Leistung im gleichen Zeitraum einherging. Das Verhältnis LF/HF als Ausdruck der sympathovagalen Balance (86,105) veränderte sich zum Ende der Dunkelphase zu Gunsten des LF-Anteils. Die Sympathikusaktivität nahm zu Lasten des Parasympathikuseinflusses zu. Diese Veränderung erreichte bis zum dritten Tertial im paarweisen Kontrastvergleich Signifikanz  $p < 0,05$  (Seite 68-72). Folgt man der etablierten Einschätzung der Zuordnung der Frequenzspektren bezüglich der Aktivität des autonomen Nervensystems (13,106,107), kann die beschriebene Entwicklung als Zeichen einer Stressreaktion mit Erhöhung des Sympathikustonus über die Zeit der Isolation interpretiert werden. Die vorliegenden Ergebnisse der Untersuchung von 2017/2018 mittels nächtlicher Langzeitmessungen stützen die Ergebnisse einer vorangegangenen Messreihe, durchgeführt mit morgendlichen Kurzzeitmessungen an wachen Probanden auf der Neumayer Station III in den Jahren 2013 bis 2015 (12).

Als zentrale Ergebnisse der Fragestellung lassen sich postulieren:

Die Isolationsphase während der antarktischen Überwinterung geht einher mit Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität und den hiervon abgeleiteten Faktoren.

Die Dauer einer elektrischen Herzaktion erreicht ihr Minimum zum Ende der Dunkelphase. Es wird der Tiefpunkt von Fitness und Wohlbefinden der Probanden erreicht (13,76,89,91,108).

Die Faktoren der Zeitdomäne pNN50 und rMSSD zeigen den zunehmenden Verlust der Regenerationsfähigkeit und das Absinken der Parasympathikusaktivität zum Ende der Dunkelphase an. Das gleichzeitige Unterschreiten des kritischen Wertes von 50 ms für SDNN durch einzelne Probanden zeigt alarmierend ein erhöhtes Risiko für Morbidität und Mortalität (13,88). Der Verlust der Regenerationsfähigkeit ist kennzeichnend für die Erschöpfungsphase bei anhaltendem Stressstimulus.

Die sympathovagale Balance verändert sich nachvollziehbar mit einer Abnahme der repräsentativen parasympathisch verknüpften Faktoren rMSSD und pNN50 der Zeitdomäne.

Auch mit einer Verschiebung des in der Frequenzdomäne erfassten Quotienten LF/HF zugunsten des sympathischen Anteiles zeigt sich die Reaktion auf den anhaltenden Stress einer antarktischen Langzeitisolation.

**Es ergeben sich Langzeitveränderungen der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität als Reaktion auf die Herausforderungen einer antarktischen Überwinterungskampagne. Die sympathovagale Balance verschiebt sich zu Gunsten der Sympathikusaktivität und zu Lasten der Parasympathikusaktivität.**

## 4.2. Methoden

Im Folgenden sollen die besonderen Herausforderungen, sowie die Einschränkungen dieser Arbeit beziehungsweise des Studienaufbaus eingeordnet und diskutiert werden.

### 4.2.1. Studienaufbau

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte auf freiwilliger Basis. Die Gruppe der Überwinterer war mit 10 Personen 2018 und 12 Personen 2017 klein. Einige Teammitglieder waren nicht zur Teilnahme zu motivieren oder haben sich im Verlauf der Untersuchungsdauer gegen eine weitere Beteiligung entschieden. Insbesondere war im dritten Viertel der Isolationsphase die Motivation zur Studienteilnahme schwer aufrecht zu erhalten. Das monatliche Tragen des Faros eMotion EKG Recorders (94) über 24 Stunden hinweg wurde von den Testpersonen mit voranschreitender Isolationszeit zunehmend als Belastung wahrgenommen. Ein allgemeines Motivations- und Antriebstief kann, bezogen auf die gesamte Isolationsphase, als Ausdruck eines "third quarter phenomenon" kontrovers diskutiert werden (38,109,110).

Aus den aufgeführten Gründen ergibt sich für die statistische Auswertung in dieser Arbeit eine Probandengruppe mit nur 13 Teilnehmenden.

Trotz der kleinen Gruppe von Studienteilnehmenden handelte es sich um eine vielfältig gemischte Probandengruppe. Die gesundheitlichen Voraussetzungen entsprachen den arbeitsmedizinischen Standards für einen Einsatz in der Antarktis, jedoch bestanden individuell deutliche Unterschiede in Fitness- und Aktivitätsgrad, Körpergewicht, Ernährungszustand, Sozialverhalten und psychischer Resilienz (100,111). Die Tagesabläufe und Belastungen unterschieden sich je nach Aufgabenprofil deutlich. Die körperliche Arbeit des einen Teammitgliedes kontrastierte mit der vorwiegend sitzenden Tätigkeit des

anderen. Außeneinsätze auch bei widrigen Witterungsbedingungen waren für einige Teammitglieder die Regel und für andere die Ausnahme.

Darüber hinaus zeigten die Studienteilnehmenden verschiedene Vorlieben und Freizeitaktivitäten. Es bestand eine hohe Variabilität in Schlafverhalten, sozialer Interaktion, sportlicher Aktivität, sowie bei der Ernährungsweise. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Alter, Geschlecht, physiologischer Disposition und individuellem Verhalten während der Isolationszeit die ausgewerteten Faktoren der Herzfrequenzvariabilität individuell verändert und bei einer derartig kleinen Probandengruppe das Ergebnis verzerren kann. Die Altersspanne war in den Jahren 2017/2018 vergleichsweise moderat ausgeprägt, sie reichte vom 24. bis zum 40. Lebensjahr. Das Verhältnis weiblicher Teilnehmerinnen zu Teilnehmern männlichen Geschlechts war 3:10.

Zusammenfassend muss postuliert werden, dass sich die Überwinterungsgruppen heterogen zusammensetzten, multifaktoriell unterschieden und über den Zeitraum der Isolation verschieden entwickelten.

Die Auswertung der EKG-Daten erfolgte nach initialer Sichtung und manueller Korrektur. Es zeigte sich im Rahmen der Datensichtung, dass die Aufzeichnungen im Zeitraum mit Tätigkeiten während des Tages artefaktbeladen und je nach Aufgabenprofil starken Unregelmäßigkeiten und sogar Aufzeichnungspausen unterworfen waren (schwere körperliche Arbeit, Außeneinsatz, Untätigkeit, Sporeinheiten, Duschen).

Um für die Datenauswertung einen annähernd störungsfreien, vergleichbaren Zeitabschnitt zu erhalten, wurden sechs Nachtstunden der zweiten Nachthälfte von 00:00 bis 06:00 Uhr UTC zur Auswertung selektiert. Die Entscheidung zur Wahl der zweiten Nachthälfte fiel unter der Annahme, dass in den frühen Morgenstunden mit beginnendem Erwachen sowohl parasympathische als auch sympathische Aktivität beobachtet werden

kann (14,15) und somit beide Komponenten der sympathovagalen Balance zum Tragen kommen. Faktoren im Zeit- und Frequenzbereich (Zeit- und Frequenzdomäne) wurden entsprechend der zentralen Fragestellung gewählt (13,76,89,112).

#### 4.2.2. Aufgezeichnete und ausgewertete Faktoren der Zeitdomäne

NN-Intervall – die Dauer einer elektrischen Herzaktion und die davon abgeleitete Herzfrequenz wurden gewählt, da damit der Aktivitätsgrad und/oder Trainingszustand zuverlässig bewertet werden kann. Die niedrige Herzfrequenz in Ruhe wird als Zeichen für Fitness und Wohlbefinden und die hohe Herzfrequenz in Ruhe als stressinduziert und Ausdruck übermäßiger Aktivierung gedeutet (13,76,89,91,108).

SDNN – die Standardabweichung der Dauer des Zeitintervalls zwischen zwei Herzschlägen gibt Auskunft über die Gesamtvariabilität des Herzschlags und wurde ausgewählt, um die grundlegende Fähigkeit zur Herzfrequenzvariabilität zu erfassen und den Einfluss des Vegetativums abzuschätzen (13,76,113). Der SDNN ist in der klinischen Risikobewertung ein wesentlicher Indikator (13).

Die Wahl des Faktors pNN50 – der prozentuale Anteil der Intervalle mit mindestens 50 ms Abweichung vom vorausgehenden Intervall erfolgte, da in der Fachliteratur pNN50 als Kenngröße des parasympathischen Anteils des vegetativen Nervensystems bewertet und anerkannt wird (13,17,76,89,113).

rMSSD – die Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle zeigt im Rahmen einer Stressreaktion nach etablierter Lehrmeinung eine Veränderung (13,17,76,89). Der rMSSD ist ein robuster Indikator für die parasympathische Aktivität und Regenerationsfähigkeit des Körpers und hat sich auch in dieser Analyse bewährt. Darüber hinaus zeigt sich rMSSD relativ frei vom Einfluss respiratorischer Kopplungsmechanismen (114).

#### 4.2.3. Aufgezeichnete und ausgewertete Faktoren der Frequenzdomäne

LF/HF – dem aussagekräftigen Verhältnis von LF-Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,04 – 0,15 Hz zu HF-Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,15 – 0,4 Hz liegt die Annahme zu Grunde, dass der Hauptanteil der LF-Komponente den sympathischen und die HF-Komponente den parasympathischen Anteil des autonomen Nervensystems repräsentiert. Dies schlägt sich im LF/HF Verhältnis nieder – ein hoher Wert zeigt anteilig hohe sympathische Aktivität, ein niedriger Wert anteilig hohe parasympathische Aktivität. Damit ist LF/HF der wesentliche umspannende Faktor zur Beantwortung der Frage nach der Veränderung der sympathovagalen Balance.

Die Interpretation der Studienergebnisse muss in Zusammenschau mit den Rahmenbedingungen der standardisierten Aufzeichnung erfolgen. Mit Aufzeichnungen im Schlaf ohne Artefakte, Grenzbelastung oder plötzliche Lagewechsel sollten über den Beobachtungszeitraum sinnvolle Vergleichswerte entstehen. Damit kann in dieser Arbeit der Quotient LF/HF sehr wahrscheinlich als belastbarer Indikator zur Deutung der sympathovagalen Balance herangezogen werden. Der Ursprung des LF/HF Index bleibt wegen seiner Störanfälligkeit im wissenschaftlichen Diskurs umstritten (10,75,86,87).

#### 4.2.4. Monatliche Auswertung und Auswertung nach Unterteilung in Tertiale

Die Messungen erfolgten monatlich mit Hilfe des EKG-Recorders eMotion FAROS (94), über einen 24-stündigen Zeitraum. Dementsprechend erfolgte auch die initiale Auswertung in monatlichen Abständen.

Im Rahmen der monatlichen Auswertung zeigten sich Hinweise auf Veränderungen im Sinne einer Stressreaktion und Veränderungen der sympathovagalen Balance. Es erschien daher sinnvoll, den Jahresverlauf zusätzlich in Zeitabschnitte entsprechend den drei vorherrschenden Lichtperioden der Isolationsphase zu unterteilen. Diese Einteilung erfolgte bereits in vorangegangenen Untersuchungen, um damit eine bessere Vergleichbarkeit mit diesen Vorarbeiten zu ermöglichen (12).

Periode *T1* südpolarer Herbst mit abnehmender Tageslichtdauer; umfasst die Monate Februar, März und April.

Periode *T2* südpolarer Winter und damit die Zeit der mehr als 60 Tage währenden Südpolarnacht; umfasst die Monate Mai, Juni und Juli.

Periode *T3* südpolares Frühjahr mit zunehmender Tageslichtdauer; umfasst die Monate August, September und Oktober.

#### 4.2.5. Einschränkungen

Für die vorliegende Arbeit gelten folgende Einschränkungen:

Es handelte sich um eine kleine Probandengruppe. Einzelne Probanden wiesen deutliche Unterschiede im Verhalten und Konstitution auf. Messpunkte einzelner Probanden liegen auf Grund gestörter, nicht erfolgter oder inkompletter Aufzeichnung nicht vor oder mussten verworfen werden. Probanden mit weniger als acht verwertbaren 24 Stunden EKG Aufzeichnungen konnten nicht betrachtet werden. Das Aufgabenprofil und das zu erwartende Kooperationsverhalten der Forschenden und des technischen Personals erlaubte

keine Steigerung der Aufzeichnungszeitpunkte oder Wiederholung fehlerhafter Aufzeichnungen. Ein Verlust der generellen Akzeptanz für die Durchführung der EKG-Aufnahme musste gegen den Mehrwert einer verbesserten Datendichte abgewogen werden.

Die EKG-Aufzeichnungen erfolgten mitunter nicht am selben Tag, sondern individuell gestaffelt innerhalb der ersten Monatshälfte, da die erforderlichen technischen und wissenschaftlichen Stationsarbeiten Priorität hatten. Ideal für die Studiendurchführung wäre ein standardisierter Tagesablauf, der Artefakte in der Aufzeichnung möglichst vermeidet. Dies ist mit dem realen Stationsalltag jedoch unvereinbar. Als weitgehender Kompromiss wurde ein störungsarmer repräsentativer Auswertungszeitraum über 6 Stunden während des Nachtschlafes der Testpersonen gewählt. Die für kleine Stichproben passende robuste Auswertung erfolgte primär deskriptiv mit graphischer Darstellung als "box-plot".

Die weitere Prüfung der Ergebnisse auf statistische Signifikanz bei kleiner Probandengruppe erfolgte unter Anwendung der Kenward-Roger-Approximation-Methode. Diese Methode erlaubt eine Annäherung bei kleineren Stichproben, indem die Zufallsstruktur in den Daten abgeschätzt wird (96). Ergänzend erfolgte die Anpassung nach Bonferroni zur weiteren Prüfung des Kontrastes zwischen einzelnen monatlichen Messpunkten bzw. zwischen einzelnen Tertialen der Lichtperioden. Die Bonferroni-Korrektur korrigiert die Kumulierung des Fehlers 1. Art bei multiplen Vergleichen (97). Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf 0,05 festgelegt. Die Ergebnisse finden sich im Abschnitt 3.2-3.6. (Seite 48ff). Ziel war es, Muster in der Ergebnisstruktur offen zu legen. In dieser Untersuchung wurden keine Einzelkausalitäten zwischen Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität, der Regulation des autonomen Nervensystems und einzelnen definierten Einflussgrößen herausgearbeitet. Es wird das Gesamtsetting "Überwinterung und Isolation" in seiner Auswirkung beurteilt.

## 5. Ausblick

Die vorliegende Arbeit weist auf wesentliche Anpassungsprozesse auf die Extrembedingung im Zuge einer Langzeitisolation in der Antarktis hin und soll vertiefende Untersuchungen anregen. Wünschenswert sind erweiterte Untersuchungen, welche die Daten der Herzfrequenzvariabilität mit körperlicher Aktivität, Ernährungsparametern, laborchemischer Stresshormonbestimmung und psychologischem Monitoring bezüglich Stress, Befinden und Stimmung korrelieren.

Vorstellbar sind häufigere und möglichst komfortablere Messungen mit Hilfe moderner Wearables zur dauerhaften Erfassung von körperlicher Aktivität und elektrischer Herzaktion. Bei erhöhter Datendichte muss die Auswertungssoftware technisch weiterentwickelt werden, um Abweichungen von physiologischer Herzaktivität zu erkennen und eine sichere Identifikation von aufeinander folgenden normalen Herzaktionen zu gewährleisten. Moderne Software sollte im besten Fall selbstlernend sein und damit den manuellen Korrekturaufwand zuverlässig minimieren.

Anpassungsprozesse einer langfristig andauernden Extremsituation auf die menschliche Physis sollte nicht nur beschrieben werden. Es muss der weiterführenden Forschung gelingen, konkrete Standards, Werkzeuge und entlastende Strategien zur Erhaltung von Gesundheit und Wohlbefinden herauszuarbeiten.

Es bleibt das Ziel, mit Hilfe physiologischer Grundlagenforschung in der Antarktis den Weg durch Extremsituationen zu ebnen - sei es im Rahmen von Weltraummissionen oder auch in der Erforschung lebensfeindlicher, unwirtlicher Regionen unserer Erde.

Auch im Hinblick auf die Herausforderungen zur Bewältigung der Covid19 Pandemie bleiben Isolationsstudien aktuell und in ihren Aussagen relevant.

In weiteren Studien sollte die klinische Bedeutung von Isolation, z.B. die extreme Erfahrung einer Langzeitisolation eines Intensivstationsaufenthaltes, ebenso in den Fokus gerückt werden.

Die Herzfrequenzvariabilität bietet hierbei ein ideales, technisch einfach anwendbares, nicht invasives Werkzeug zur Risikoabschätzung und Therapiebegleitung (13).

# Literaturverzeichnis

1. Humboldt A von. Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Band 1  
Stuttgart und Tübingen: Cotta; 1845.
2. Budd GM, Warhaft N. Body temperature, shivering, blood pressure and heart rate during a standard cold stress in Australia and Antarctica. *The Journal of Physiology*. 1966;186(1):216–32.
3. Budd GM, Gunderson EKE. Human adaptability to Antarctic conditions. *Antarctic Research Series*. 1974; 22:41
4. Palinkas LA, Gunderson EKE, Johnson JC, Holland AW. Behavior and performance on long-duration spaceflights: Evidence from analogue environments. *Aviation Space and Environmental Medicine* 2000;71:9 A29-A36.
5. Palinkas LA, Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions., *The Lancet*. 2008; 37(1):153–163.
6. Suedfeld P, Weiss K. Antarctica: Natural laboratory and space analogue for psychological research. *Environment and Behavior*. 2000; 32(1):7–17.
7. Edholm OG. Medical research by the British Antarctic Survey. *Polar Records* 1965; 12(80):575–82.
8. Wolbarsht ML. Antarctica. *Polar Research and Discovery During the International Geophysical Year*. The Quarterly Review of Biology. Vol. 40. New York: Holt, Rinehart and Winston. 1965; p80
9. Collet J, Novara M. Global approach to simulation: A gateway to long-term human presence in space. *Advances in Space Research*. 1992; Vol. 12(1):285-99.  
doi:10.1016/0273-1177(92)90297-b

10. Berntson GG, Thomas Bigger J, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul P, Stone PH, van der Molen MW. Heart rate variability: Origins methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. Blackwell Publishing Inc.1997;34:623–48.
11. Shaffer F, McCraty R, Zerr CL. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Frontiers in Psychology*. September 2014; 5:1040. doi:10.3389/fpsyg.2014.01040
12. Maggioni MA, Merati G, Castiglioni P, Mendt S, Gunga HC, Stahn AC. Reduced vagal modulations of heart rate during overwintering in Antarctica. *Nature Scientific Reports*. 11 Dezember 2020; 10(1): 21810. doi:10.1038/s41598-020-78722-3
13. Malik M, John Camm A, Thomas Bigger J, Breithardt G, Cerutti S, Cohen RJ, Coumel P, Ernest L, Kennedy HL, Kleiger RE, Lombardi F, Moss AJ, Rottmann JN, Schmidt G, Schwartz PJ, Singer DH. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*. 1996; 93(5):1043–65.
14. Pittman-Polletta BR, Scheer FAJL, Butler MP, Shea SA, Hu K. The role of the circadian system in fractal neurophysiological control. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*. 2013; 88(4):873-94. doi:10.1111/brv.12032
15. Panza JA, Epstein SE, Quyyumi AA. Circadian Variation in Vascular Tone and Its Relation to  $\alpha$ -Sympathetic Vasoconstrictor Activity. *The New England Journal of Medicine*. 1991; 325(14):986-90. doi:10.1056/NEJM199110033251402

16. Bootsma M, Swenne CA, Van Bolhuis HH, Chang PC, Cats VM, Brusckhe AVG. Heart rate and heart rate variability as indexes of sympathovagal balance. *The American Journal of Physiology*. 1994; 266(4):H1565-71. doi:10.1152/ajpheart.1994.266.4.H1565
17. Pichot V, Busso T, Roche F, Garet M, Costes F, Duverney D, Lacour JR, Barthélémy JC. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: A laboratory study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Oktober 2002; 34(10):1660-6. doi:10.1097/00005768-200210000-00019
18. Fretwell P, Pritchard HD, Vaughan DG, Bamber JL, Barrand NE, Bell R, Bianchi C, Bingham R G, Blankenship D D, Cassasa G, Catani G, Callens D, Conway H, Cook A J, Corr HFJ, Damaske D, Damm V, Ferraccioli F, Forsberg R, Fujita S, Gim Y, Gogineni P, Griggs JA, Hindmarsh CA, Holmlund P, Holt JW, Jacobel RW, Jenkins A, Jokat W, Jordan T, King EC, Kohler J, Krabill W, Riger-Kusk M, Langley KA, Leitchenkov G, Leuschen C, Luyendyk BP, Matsuoka K, Mouginot J, Nitsche FO, Nogi Y, Popov SV, Rignot E, Rippin DM, Rivera A, Roberts J, Ross N, Siegert MJ, Smith AM, Steinhage D, Studinger M, Sun B, Tinto BK, Welch BC, Wilson D, Young DA, Xiangbin C, Zirizzotti A. Bedmap2: Improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere*. 2013; 6:4305–4361. doi:10.5194/tcd-6-4305-2012 abgerufen 16.09.2022
19. Blümel WD. *Physische Geographie der Polargebiete*. Teubner Studienbücher der Geographie; 1999
20. Astronomical Applications Department. U. S. Naval Observatory Washington D. Amundsen Scott Base Duration of Daylight. abgerufen 18.10.2018 <http://aa.usno.navy.mil>

21. Tiedemann K. Das Internationale Geophysikalische Jahr in den Polargebieten. Polarforschung. 1957; 27(1/2):41–3.
22. COMNAP. ANTARCTIC STATION CATALOGUE Council of Managers of National Antarctic Programs. August 2017. abgerufen am 18.10.2018 [https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP\\_Antarctic\\_Station\\_Catalogue.pdf](https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP_Antarctic_Station_Catalogue.pdf)
23. Tin T, Sovacool BK, Blake D, Magill P, El Naggat S, Lidstrom S, Ishizawa K, Berte J. Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica. Renew Energy. 2010; 35(8):1715–23. doi:10.1016/j.renene.2009.10.020
24. Rothblum ED. Psychological factors in the antarctic. The Journal of Psychology. 1990; 124(3):253-73. doi:10.1080/00223980.1990.10543221 abgerufen 16.09.2022
25. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Neumayer-Station III. abgerufen 10.10.2018 <https://www.awi.de/expedition/stationen/neumayer-station-iii.html>
26. Pauls M, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Vor 25 Jahren: Eröffnung der ersten deutschen Antarktisstation Pressemitteilung 20. April 2001. abgerufen 10.10.2018. <http://dw-online.de/pages/de/news33157>
27. Umweltbundesamt. Das Antarktis-Vertragssystem 27.12.2021. abgerufen 16.09.2022 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/antarktis/das-antarktisvertragssystem>

28. Centre SNI. Statistical Yearbook of Norway 2013 Geographical survey 2013  
abgerufen 10.10.2018 <http://www.ssb.no/a/english/aarbok/kart/i.html>
29. The Council of Managers of National Antarctic Programs COMNAP Secretariat..  
August 2017; 79-81 abgerufen 18.10.2018  
[https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP\\_Antarctic\\_Station\\_Catalogue.pdf](https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP_Antarctic_Station_Catalogue.pdf)
30. Cook FA. Through the First Antarctic Night - 1898-1899: A Narrative of the Voyage  
of the "Belgica" Among Newly Discovered Lands and Over an Unknown Sea about  
the South Pole. New York: Doubleday, Page & Company; 1899.
31. Lemmons R. The Third International Polar Year International Geophysical Year  
1957 1958 abgerufen 19.09.2022 <https://www.climate-policy-watcher.org/antarctic-climate/the-third-international-polar-yearinternational-geophysical-year-19571958.html>
32. Schram Stokke O, Vidas D, Governing the Antarctic: The Effectiveness and  
Legitimacy of the Antarctic Treaty System. Cambridge: Cambridge University  
Press; 1996.
33. Budd GM. General acclimatization to cold in men studied before, during and after  
a year in Antarctica. Australian National Research Expedition Reports 70.  
Melbourne; 1964.
34. Easty DL. Food intake in Antarctica. British Journal of Nutrition. 1967; 21(1):7-15.  
doi:10.1079/BJN19670004

35. Tanaka M, Watanabe S. Overwintering in the antarctica as an analog for long term manned spaceflight. *Advances in Space Research : the Official Journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*. 1994; 14(8):423-30. doi:10.1016/0273-1177(94)90435-9
36. Rivolier J. *Man in the Antarctic: the scientific work of the International Biomedical Expedition to the Antarctic (IBEA)*. London, New York: Taylor & Francis; 1988.
37. Holland AW. NASA investigations of isolated and confined environments. *Advances in Space Biology and Medicine* 1993; 3:15-21. doi:10.1016/s1569-2574(08)60094-5
38. Palinkas LA. *The Psychology of Isolated and Confined Environments: Understanding Human Behavior in Antarctica*. *The American Psychologist*. 2003; 58(5):353-63. doi:10.1037/0003-066x.58.5.353
39. Smart J, Bacal K. *Space medicine: the new frontier*. *Wilderness Medicine*. 6th Edition Auerbach P. Philadelphia: Elsevier/Mosby; 2012. p. 2172–202.
40. Speckmann EJ, Hescheler J, Köhling R. *Physiologie*. 6.Auflage. München: Urban & Fischer; 2013.
41. Schmidt RF, Lang F, Thews G. *Physiologie des Menschen Mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer; 2004
42. Trepel M. *Neuroanatomie - Struktur und Funktion*. 5. Auflage. *Neuroanatomie - Struktur und Funktion*. München: Urban & Fischer; 2011.
43. Rohen JW, Lütjen-Drecoll E. *Funktionelle Anatomie des Menschen: Lehrbuch der makroskopischen Anatomie nach funktionellen Gesichtspunkten*. 11. Auflage. Stuttgart: Schattauer; 2005.

44. Aviado DM, Guevara Aviado D. The Bezold-Jarisch reflex. A historical perspective of cardiopulmonary reflexes. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2001; 940:48-58. doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03666.x
45. Glower DD, Spratt JA, Snow ND, Kabas JS, Davis JW, Olsen CO, Tyson GS, Sabiston Jr DC, Rankin JS. Linearity of the Frank-Starling relationship in the intact heart: The concept of preload recruitable stroke work. *Circulation*. 1985; 71(5):994-1009. doi:10.1161/01.cir.71.5.994
46. Cannon WB. Organisation for Physiological Homeostasis. *Physiological Reviews*. 1929; 9(3):399–431.
47. Goldstein DS, Kopin IJ. Evolution of concepts of stress. *Stress (Amsterdam, Netherlands)* 2007; 10(2):109-20. doi:10.1080/10253890701288935
48. Cicchetti D. Resilience under conditions of extreme stress: A multilevel perspective. *World psychiatry : official journal of the World Psychiatric Association (WPA)*. 2010; 9(3):145-54. doi:10.1002/j.2051-5545.2010.tb00297.x
49. Mullin CS. Some psychological aspects of isolated Antarctic living. *The American Journal of Psychiatry*. 1960; 117:323-5. doi:10.1176/ajp.117.4.323
50. Lazarus RS. Psychological stress in the workplace. *Journal of UOEH*. 1989; 11:528-40.
51. Berger M. *Psychische Erkrankungen: Klinik und Therapie*. 5. Auflage. München: Urban & Fischer Verlag, Elsevier GmbH; 2014.
52. Kent ST, McClure LA, Crosson WL, Arnett DK, Wadley VG, Sathiakumar N. Effect of sunlight exposure on cognitive function among depressed and non-depressed participants: a REGARDS cross-sectional study. *Environmental Health*. 2009; 8:34 doi:10.1186/1476-069X-8-34

53. Matheson GJ, Schain M, Almeida R, Lundberg J, Cselényi Z, Borg J, Varrone A, Farde L, Cervenka S. Diurnal and seasonal variation of the brain serotonin system in healthy male subjects. *NeuroImage*. 2015; 112:225-231. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.03.007
54. Lambert GW, Reid C, Kaye DM, Jennings GL, Esler MD. Effect of sunlight and season on serotonin turnover in the brain. *Lancet (London, England)* 2002; 360(9348):1840-2. doi:10.1016/s0140-6736(02)11737-5
55. Kristal-Boneh E, Froom P, Harari G, Malik M, Ribak J. Summer-winter differences in 24 h variability of heart rate. *Journal of Cardiovascular Risk* 2000; 7(2):141-6. doi:10.1177/204748730000700209
56. Vandewalle G, Middleton B, Rajaratnam SMW, Stone BM, Thorleifsdottir B, Arendt J, Dijk DJ. Robust circadian rhythm in heart rate and its variability: Influence of exogenous melatonin and photoperiod. *Journal of Sleep Research*. 2007; 16(2):148-55. doi:10.1111/j.1365-2869.2007.00581.x
57. Chellappa SL, Lasauskaite R, Cajochen C. In a heartbeat: Light and cardiovascular physiology. *Frontiers in Neurology*. 2017; 8:541. doi:10.3389/fneur.2017.00541
58. Scheer FAJL, Van Doornen LJP, Buijs RM. Light and diurnal cycle affect autonomic cardiac balance in human; possible role for the biological clock. *Autonomic Neuroscience : basic & clinical*. 2004; 110(1):44-8. doi:10.1016/j.autneu.2003.03.001
59. Irwin MR. Sleep and inflammation: partners in sickness and in health. *Nature reviews. Immunology*. 2019; 19(11):702-715. doi:10.1038/s41577-019-0190-z

60. Roberts RE, Duong HT. The prospective association between sleep deprivation and depression among adolescents. *Sleep*. 2014; 37(2):239-44. doi:10.5665/sleep.3388
61. Yates NJ. Schizophrenia: the role of sleep and circadian rhythms in regulating dopamine and psychosis. *Reviews in the Neurosciences*. 2016; 27(7):669-687. doi:10.1515/revneuro-2016-0030
62. Pinato L, Galina Spilla CS, Markus RP, da Silveira Cruz-Machado S. Dysregulation of Circadian Rhythms in Autism Spectrum Disorders. *Current Pharmaceutical Design* 2019; 25(41):4379-4393. doi:10.2174/1381612825666191102170450
63. Mutluer T, Karakoc Demirkaya S, Abali O. Assessment of sleep problems and related risk factors observed in Turkish children with Autism spectrum disorders. *Autism Research*. 2016; 9(55):36-42. doi:10.1002/aur.1542
64. Yavuz-Kodat E, Reynaud E, Geoffray MM, Limousin N, Franco P, Bonnet-Brilhault F, Bourgin P, Schroder CM. Disturbances of Continuous Sleep and Circadian Rhythms Account for Behavioral Difficulties in Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Clinical Medicine*. 24 Jun. 2020; 9(6):1978. doi:10.3390/jcm9061978
65. Van Someren EJW. Circadian and sleep disturbances in the elderly. *Experimental Gerontology*. 2000; 35(9-10):1229-37. doi:10.1016/s0531-5565(00)00191-1
66. Lange T, Dimitrov S, Born J. Effects of sleep and circadian rhythm on the human immune system. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2010; 1193:48-59. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05300.x

67. McEwen BS. Sleep deprivation as a neurobiologic and physiologic stressor: Allostasis and allostatic load. *Metabolism: clinical and experimental*. 2006; 55(10 Suppl 2):S20-3. doi:10.1016/j.metabol.2006.07.008
68. Patel AK, Reddy V, Araujo JF. *Physiology, Sleep Stages*. StatPearls Publishing, 28 April 2022. abgerufen 19.09.2022  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK526132/>
69. Somers VK, Dyken ME, Mark AL, Abboud FM. Sympathetic-Nerve Activity during Sleep in Normal Subjects. *The New England Journal of Medicine*. 1993; 328(5):303-7. doi:10.1056/NEJM199302043280502
70. Silvani A, Dampney RAL. Central control of cardiovascular function during sleep. *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*. 2013; 305(12): H1683-92. doi:10.1152/ajpheart.00554.2013
71. Malik J, Lo YL, Wu HT. Sleep-wake classification via quantifying heart rate variability by convolutional neural network. *Physiological Measurement*. 2018; 39(8):085004. doi:10.1088/1361-6579/aad5a9
72. Snyder F, Hobson JA, Morrison DF, Goldfrank F. Changes in respiration, heart rate, and systolic blood pressure in human sleep. *Journal of Applied Physiology*. 1964; 19:417-22. doi:10.1152/jappl.1964.19.3.417
73. Dimitrov S, Benedict C, Heutling D, Rgen Westermann J, Born J, Lange T. Cortisol and epinephrine control opposing circadian rhythms in T cell subsets. *Blood*. 2009;113(21):5134-43. doi:10.1182/blood-2008-11-190769

74. Vargas I, Lopez-Duran N. The cortisol awakening response after sleep deprivation: Is the cortisol awakening response a “response” to awakening or a circadian process? *Journal of Health Psychology*. 2020; 25(7):900-912. doi:10.1177/1359105317738323
75. Billman GE. Heart rate variability - A historical perspective. *Frontiers in Physiology* 2011; 2:86. doi:10.3389/fphys.2011.00086
76. Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*. 2017; 5:258. doi:10.3389/fpubh.2017.00258
77. Benichou T, Pereira B, Mermillod M, Tauveron I, Pfabigan D, Maqdasy S, Dutheil F. Heart rate variability in type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *PloS one*. 2018; 13(4):e0195166 doi:10.1371/journal.pone.0195166
78. Murgia F, Melotti R, Foco L, Gögele M, Meraviglia V, Motta B, Steger A, Toifl M, Sinnecker D, Müller A, Merati G, Schmidt G, Rossini A, Pramstaller PP, Pattaro C. Effects of smoking status, history and intensity on heart rate variability in the general population: The CHRIS study *PloS one*. 2019; 14(4):e0215053. doi:10.1371/journal.pone.0215053
79. Borchini R, Veronesi G, Bonzini M, Gianfagna F, Dashi O, Ferrario MM. Heart rate variability frequency domain alterations among healthy nurses exposed to prolonged work stress. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(1):113. doi:10.3390/ijerph15010113
80. Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP. Heart rate variability and occupational stress— systematic review. *Industrial Health*. 2018; 56(6):500-511. doi:10.2486/indhealth.2017-0190

81. Evrengul H, Tanriverdi H, Kose S, Amasyali B, Kilic A, Celik T, Turhan H. The relationship between heart rate recovery and heart rate variability in coronary artery disease. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 2006; 11(2):154-62. doi:10.1111/j.1542-474X.2006.00097.x
82. Hon EH, Lee ST. Electronic Evaluation Of The Fetal Heart Rate. Patterns Preceding Fetal Death, Further Observations. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*. 1963; 87:814-26.
83. Kleiger RE, Miller JP, Bigger JT, Moss AJ. Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *The American Journal of Cardiology*. 1987; 59(4):256-62. doi:10.1016/0002-9149(87)90795-8
84. Vigo DE, Tuerlinckx F, Ogrinz B, Wan L, Simonelli G, Bersenev E, Van Den Bergh O, Aubert AE. Circadian rhythm of autonomic cardiovascular control during mars500 simulated mission to mars. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2013; 84(10):1023-8. doi:10.3357/ase.3612.2013
85. Pichot V, Roche F, Celle S, Barthélémy JC, Chouchou F. HRV analysis: A free software for analyzing cardiac autonomic activity. *Frontiers in Physiology*. 2016; 7:557. doi:10.3389/fphys.2016.00557
86. Eckberg DL. Sympathovagal balance: A critical appraisal. *Circulation*. 1997; 96(9):3224-32. doi:10.1161/01.cir.96.9.3224
87. McCraty R, Shaffer F. Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Global Advances in Health and Medicine*: 2015; 4(1):46-61. doi:10.7453/gahmj.2014.073

88. Kleiger RE, Stein PK, Bigger JT. Heart rate variability: Measurement and clinical utility. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*. 2005; 10(1):88-101. doi:10.1111/j.1542-474X.2005.10101.x
89. Sammito S, Thielmann B, Seibt R, Klussmann a, Weippert M, Böckelmann I. Leitlinie Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft. AWMF Leitlinie. 2014. doi:10.13140/2.1.5052.7684.
90. DeGiorgio CM, Miller P, Meymandi S, Chin A, Epps J, Gordon S, Gornbein J, Harper RM. RMSSD, a measure of vagus-mediated heart rate variability, is associated with risk factors for SUDEP: The SUDEP-7 Inventory. *Epilepsy & Behavior*. 2010; 19(1):78-81. doi:10.1016/j.yebeh.2010.06.011
91. Nunan D, Sandercock GRH, Brodie DA. A quantitative systematic review of normal values for short-term heart rate variability in healthy adults. *Pacing and Clinical Electrophysiology: PACE*. 2010; 33(11):1407-17. doi:10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x
92. Burr LR. Interpretation of normalized spectral heart rate variability indices in sleep research: a critical review. *Sleep*. 2007; 30(7):913-9. doi:10.1093/sleep/30.7.91
93. Weltärztebund. WMA Deklaration von Helsinki - Ethische Grundsätze für die medizinische Forschung am Menschen. WMA-Generalversammlung. 2013. abgerufen 21.09.2022 [https://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user\\_upload/\\_old-files/downloads/pdf-Ordner/International/Deklaration\\_von\\_Helsinki\\_2013\\_20190905.pdf](https://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user_upload/_old-files/downloads/pdf-Ordner/International/Deklaration_von_Helsinki_2013_20190905.pdf)
94. Mega Electronics Ltd. eMotion Faros Series Manual 2.3.0. 2017. abgerufen 18.10.2018 <http://www.megaemg.com>

95. Tukey JW. Exploratory data analysis. Reading Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company; 1977.
96. Chawla A, Maiti T, Sinha S. Kenward-Roger approximation for linear mixed models with missing covariates. 2014. abgerufen 21.09.2022 [https://www.stt.msu.edu/Links/Research\\_Memoranda/RM/RM\\_706.pdf](https://www.stt.msu.edu/Links/Research_Memoranda/RM/RM_706.pdf)
97. Shaffer JP. Multiple hypothesis testing. *Annual Review of Psychology*. 1995; 46(1): 561-584
98. Hall M, Vasko R, Buysse D, Ombao H, Chen Q, Cashmere JD, Kupfer D, Thayer JF. Acute Stress Affects Heart Rate Variability during Sleep. *Psychosomatic Medicine*. 2004; 66(1):56-62. doi:10.1097/01.psy.0000106884.58744.09
99. Grippo AJ, Lamb DG, Carter CS, Porges SW. Social Isolation Disrupts Autonomic Regulation of the Heart and Influences Negative Affective Behaviors. *Biological Psychiatry*. 2007;62(10):1162-70. doi:10.1016/j.biopsych.2007.04.011
100. Pagel JI, Choukèr A. Effects of isolation and confinement on humans-implications for manned space explorations. *Journal of Applied Physiology*. American Physiological Society. 2016; 120(12):1449-57. doi:10.1152/jappphysiol.00928.2015
101. Vigo DE, Ogrinz B, Wan L, Bersenev E, Tuerlinckx F, Van den Bergh O, Aubert AE. Sleep-wake differences in heart rate variability during a 105-day simulated mission to mars. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2012; 83(2):125-30. doi:10.3357/ asem.3120.2012
102. Maggioni MA, Merati G, Castiglioni P, Mendt S, Gunga HC, Stahn AC. Reduced vagal modulations of heart rate during overwintering in Antarctica. *Scientific reports*. 2020; 10(1):21810, doi:10.1038/s41598-020-78722-3

103. Clays E, De Bacquer D, Crasset V, Kittel F, De Smet P, Kornitzer M, Karasek R, De Backer G. The perception of work stressors is related to reduced parasympathetic activity. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2011; 84(2):185-91. doi:10.1007/s00420-010-0537-z
104. Pichot V, Busso T, Roche F, Garet M, Costes F, Duverney D, Lacour JR, Barthélémy JC. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: A laboratory study. *Medicine and science in sports and exercise*. 2002; 34(10):1660-6. doi:10.1097/00005768-200210000-00019
105. Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S, Piccaluga E. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circulation Research*. 1986; 59(2):178-93. doi:10.1161/01.res.59.2.178
106. Hayano J, Sakakibara Y, Yamada A, Yamada M, Mukai S, Fujinami T, Yokoyama K, Watanabe Y, Takata K. Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *The American Journal of Cardiology*. 1991; 67(2):199-204. doi:10.1016/0002-9149(91)90445-q
107. Castaldo R, Melillo P, Pecchia L. Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*. Elsevier. 2015; 18:370-377 <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.012>.
108. Bootsma M, Swenne CA, Janssen MJA, Cats VM, Schaliij MJ. Heart rate variability and sympathovagal balance: pharmacological validation. *Netherlands Heart Journal*. 2003; 11(6):250-259.

109. Suedfeld P, Steel GD. The Environmental Psychology of Capsule Habitats. *Annual Review of Psychology*. 2000; 51:227-53. doi:10.1146/annurev.psych.51.1.227
110. Kanas N, Gushin V, Yusupova A. Whither the Third Quarter Phenomenon? *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2021; 92(8):689-691. doi:10.3357/AMHP.5857.2021
111. Steinach M. Physiologische Langzeitveränderungen bei Überwinterern in der Antarktis unter besonderer Berücksichtigung von Aktivitätsparametern [Dissertation]. Berlin: Charité Universitätsmedizin Berlin; 2013
112. Massaro S, Pecchia L. Heart Rate Variability (HRV) Analysis: A Methodology for Organizational Neuroscience. *Organizational Research Methods*. 2019; 22(1):354-393 doi:10.1177/1094428116681072
113. Umetani K, Singer DH, McCraty R, Atkinson M. Twenty-four-hour time domain heart rate variability and heart rate: Relations to age and gender over nine decades. *Journal of the American College of Cardiology*. 1998; 31(3):593-601. doi:10.1016/s0735-1097(97)00554-8
114. Hill LK, Siebenbrock A. Are all measures created equal? Heart rate variability and respiration - *biomed 2009*. *Biomedical sciences instrumentation*. 2009; 45:71-6.
115. Otte C, Gold SM, Penninx BW, Pariante CM, Etkin A, Fava M, Mohr DC, Schatzberg AF. Major depressive disorder., *Nature Reviews Disease Primers*. 2016; 2(Art.16065):1–21. doi:10.1038/nrdp.2016.65

# Anhang



## Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Bernhard Andreas Gropp, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

*“Langzeitisolation in der Antarktis - Veränderungen der nächtlichen Herzfrequenzvariabilität als Ausdruck einer angepassten Regulation des autonomen Nervensystems“*

*“Long term isolation in Antarctica - shifts in nocturnal heart rate variability indicating modulated regulation of the autonomic nervous system“*

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; [www.icmje.org](http://www.icmje.org)) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

---

Datum

---

Unterschrift

## Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.





## Danksagung

Die vorliegende Arbeit beruht auf Datenreihen der Jahre 2017 / 2018 und wurde von Dezember 2017 bis Dezember 2022 am Institut für Physiologie Zentrum für Weltraummedizin Berlin der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin angefertigt.

Ein besonderes Privileg war es, im Jahr 2018 als Arzt und Stationsleiter der Neumayer Station III selbst vor Ort Daten dieser Studie zu erheben und weitere physiologische Studien der beteiligten Forschungsinstitutionen zu begleiten.

Mein Dank gilt dem Alfred-Wegener-Institut (AWI), das mir als Arzt und Stationsleiter der Neumayer Station das Vertrauen aussprach, diese besondere Rolle auszufüllen. Die Erinnerung an diese spannende und lehrreiche Zeit wird mich für immer begleiten und mit der Forschungsarbeit in der Antarktis verbinden. Nur durch die Unterstützung der Mitarbeitenden des Alfred-Wegener-Instituts in praktischer, logistischer und fachlicher Hinsicht wurde es möglich, den besonderen Auftrag einer antarktischen Überwinterung zu meistern. Ich danke darüber hinaus meinem gesamten Überwinterungsteam, durch dessen Kooperation und Gestaltungswille die Überwinterung 2018 erfolgreich war.

Ich danke Prof. Gunga für das interessante Thema, die konstruktiven Anregungen und die Möglichkeit, von seinen langjährigen Erfahrungen zu profitieren.

Für die inhaltliche Ausrichtung und die thematische Eingrenzung möchte ich mich bei Dr. Martina Maggioni und Dr. Alexander Stahn bedanken. Sie haben meine Arbeit von der Vorbereitung, über die antarktische Überwinterung bis zu Auswertung mit fachlichem Rat und professionellem Lektorat geduldig begleitet.

Für die Unterstützung in der statistischen Aufarbeitung der Daten gilt mein Dank Stefan Mendt. Er hat mich sicher vor den Fallstricken der statistischen Datenverarbeitung bewahrt.

Ebenso möchte ich Nilufar Akbari vom Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie, für ihre statistische Beratung und ihr Lektorat des statistischen Teils der Arbeit danken.

Gregor Siegert war eine große Hilfe, ich lernte sein regelmäßiges wissenschaftliches Lektorat und Feedback überaus zu schätzen.

Tiefe Dankbarkeit gehört meinen Kindern Arthur und Adele, die trotz unüberbrückbarer Distanz diese 14 Monate gemeistert und mich vorbehaltlos "zurückgenommen" haben.

Großer Dank gebührt meiner Partnerin Susen-Friederike Schiela-Gropp. Ohne ihre Komplizenschaft und ihren Halt wäre das gesamte Unternehmen einer antarktischen Überwinterung und einer berufsbegleitenden Dissertation gescheitert.

Meiner Familie widme ich diese Arbeit.

**Name, Vorname: Gropp, Bernhard**

**Emailadresse: [bernhard.gropp@charite.de](mailto:bernhard.gropp@charite.de)**

**Matrikelnummer: 3595413**

**PromotionsbetreuerIn: Prof. Hanns-Christian Gunga; Dr.**

**Alexander Stahn**

**Promotionsinstitution / Klinik: Charité - Institut für Physiologie,  
Zentrum für Weltraummedizin Berlin**

Postanschrift:  
Charitéplatz 1 | 10117 Berlin  
Besucheranschrift:  
Reinhardtstr. 58 | 10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 450 562 161  
[frank.konietschke@charite.de](mailto:frank.konietschke@charite.de)  
<https://biometrie.charite.de/>



## Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass Herr Gropp innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBike) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 11.04.2022
- Termin 2: 17.08.2022
- Termin 3: 12.10.2022

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Normalverteilung graphisch prüfen oder vorn vornherein nicht-parametrische Methoden nutzen, aufgrund der kleinen Fallzahl.
- Fokus auf deskriptive Statistik setzen.
- Für die 8 Messzeitpunkte sollte ein gemischtes Modell gerechnet werden.

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 13.10.2022

**Nilufar  
Akbari**

Digital unterschrieben  
von Nilufar Akbari  
Datum: 2022.10.13  
09:50:19 +02'00'

CHARITÉ

UNIVERSITÄTSMEDIZIN BERLIN  
Institut für Biometrie und  
Klinische Epidemiologie  
Campus Charité Mitte

Name der Beraterin: Nilufar Akbari

Unterschrift BeraterIn, Institutsstempel

Charitéplatz 1 | D-10117 Berlin  
502; Reinhardtstr. 58