

Aus dem Bundeswehrkrankenhaus Berlin - Lehrkrankenhaus der  
Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

Dissertation

**Herzfrequenzvariabilität und psychometrische  
Testungen bei Bundeswehrsoldaten mit  
einsatzbedingter Posttraumatischer  
Belastungsstörung und nicht-einsatzbedingter  
Stressbelastung**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von  
Felix Paus  
aus Ibbenbüren

Datum der Promotion: 25.11.2022

# Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis . . . . .	V
Abbildungsverzeichnis . . . . .	VI
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	VII
<b>Zusammenfassung</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund . . . . .	1
1.2 Posttraumatische Belastungsstörung . . . . .	2
1.2.1 Historischer Kontext . . . . .	2
1.2.2 Diagnose und Klassifikationssysteme . . . . .	2
1.2.3 Kurzbeschreibungen der Diagnosekriterien . . . . .	4
1.2.4 Traumafolgestörungen . . . . .	7
1.2.5 Epidemiologische Einordnung der Posttraumatischen Belastungsstörung und Traumafolgestörungen im zivilen sowie militärischen Kontext	7
1.2.6 Physiologie des Symptomstress im Rahmen der Posttraumatischen Belastungsstörung . . . . .	8
1.3 Stress . . . . .	9
1.4 Herzfrequenzvariabilität . . . . .	10
1.4.1 Physiologie der Herzfrequenzvariabilität . . . . .	11
1.4.2 Parameter der Herzfrequenzvariabilität und deren Analyse . . . . .	12
1.4.3 Herzfrequenzvariabilität im Kontext physischer und psychischer Beanspruchung und Morbidität . . . . .	15
1.4.4 Zielsetzung dieser Arbeit . . . . .	16
1.5 Hypothesen . . . . .	17
1.6 Fragestellungen . . . . .	18
1.6.1 Querschnittsteil . . . . .	18
1.6.2 Längsschnittteil . . . . .	18
<b>2 Material und Methodik</b>	<b>19</b>
2.1 Studienaufbau . . . . .	19
2.1.1 Rekrutierung und Stichprobe . . . . .	20
2.1.2 Querschnittsteil . . . . .	23
2.1.3 Längsschnittteil . . . . .	24

2.2	Erhobene Parameter und Zielgrößen . . . . .	26
2.2.1	<i>Brief Symptom Inventory</i> (BSI) . . . . .	26
2.2.2	<i>Posttraumatic Stress Diagnostic Scale</i> (PDS) . . . . .	26
2.2.3	Diagnostisches Kurzinterview bei psychischen Störungen und Strukturiertes Klinisches Interview für DSM-IV . . . . .	27
2.2.4	Parameter der Herzfrequenzvariabilität . . . . .	27
2.2.5	Gerät zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität . . . . .	28
2.2.6	Arbeitsschritte zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität . . . . .	29
2.3	Statistische Auswertung . . . . .	32
2.3.1	Querschnittsteil . . . . .	32
2.3.2	Längsschnittteil . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>35</b>
3.1	Darstellung des Untersuchungskollektivs . . . . .	35
3.1.1	Alter und Einsatztage der Probanden . . . . .	35
3.1.2	Belastung der Probanden . . . . .	36
3.2	Querschnittsteil . . . . .	37
3.2.1	Gruppenunterschiede der Herzfrequenzvariabilität . . . . .	37
3.2.2	Kann man mit der HRV die Gruppenzugehörigkeit der Probanden vorhersagen? . . . . .	41
3.2.3	Korrelation von Herzfrequenzvariabilität und Symptomlast . . . . .	43
3.3	Längsschnittteil . . . . .	45
3.3.1	Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität und Korrelation mit der Änderung der Symptomlast . . . . .	45
3.3.2	Entwicklung der HRV-Parameter über drei Messzeitpunkte . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>54</b>
4.1	Herzfrequenzvariabilität, Gruppenzugehörigkeit und Symptomlast . . . . .	54
4.1.1	Herzfrequenzvariabilität von Soldaten mit einsatzbedingter posttraumatischer Belastungsstörung und einsatzerfahrenen gesunden Soldaten . . . . .	55
4.1.2	Herzfrequenzvariabilität zur Differenzierung unterschiedlicher psychischer Belastungs- und Anspannungsniveaus von einsatzunerfahrenen Soldaten . . . . .	57
4.1.3	Beurteilung im Literaturkontext . . . . .	59
4.2	Herzfrequenzvariabilität im zeitlichen Verlauf bei Soldaten mit einsatzbedingter posttraumatischer Belastungsstörung mit und ohne Therapie . . . . .	61
4.2.1	Entwicklung der Symptomlast während Therapie und Warteintervall . . . . .	61
4.2.2	Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität während Therapie und Warteintervall . . . . .	63
4.2.3	Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität nach stattgehabter Therapie . . . . .	64

4.2.4	Beurteilung im Literaturkontext . . . . .	64
4.3	Limitationen . . . . .	66
4.4	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	68
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>80</b>
	<b>Eidesstattliche Versicherung</b>	<b>81</b>
	<b>Curriculum vitae</b>	<b>82</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>83</b>

# Tabellenverzeichnis

1.1	ICD-10: Diagnosekriterien der Posttraumatischen Belastungsstörung . . . . .	3
1.2	Häufig genutzte HRV-Parameter . . . . .	14
2.1	Ein- und Ausschlusskriterien von Probanden . . . . .	22
2.2	Untersuchte HRV-Parameter . . . . .	28
2.3	Lieferumfang <i>prenoscan</i> <sup>®</sup> . . . . .	29
2.4	Grundfunktionen <i>prenoscan</i> <sup>®</sup> . . . . .	30
3.1	Darstellung der Ergebnisse des Basisfragebogens für die Merkmale „Alter“ und „Einsatztage“ für die Probandengruppen . . . . .	36
3.2	Darstellung der quantifizierten Symptomlast für die Probandengruppen . . .	37
3.3	Gruppenzugehörigkeit und SDNN (A/B, C/D) . . . . .	38
3.4	Gruppenzugehörigkeit und RMSSD (A/B, C/D) . . . . .	38
3.5	Gruppenzugehörigkeit und LF/HF-Ratio (A/B, C/D) . . . . .	39
3.6	Vorhersagekraft von SDNN für die Gruppenzugehörigkeit . . . . .	41
3.7	Vorhersagekraft von RMSSD für die Gruppenzugehörigkeit . . . . .	42
3.8	Vorhersagekraft der LF/HF-Ratio für die Gruppenzugehörigkeit . . . . .	42
3.9	Symptomlast (BSI-GSI) und HRV (A/B, C/D) . . . . .	44
3.10	Symptomlast (PDS) und HRV (A/B, C/D) . . . . .	45
3.11	$\Delta$ BSI-GSI zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	46
3.12	$\Delta$ PDS-gesamt zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	47
3.13	$\Delta$ SDNN zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	48
3.14	$\Delta$ RMSSD zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	48
3.15	$\Delta$ LF/HF-Ratio zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	49
3.16	Einfluss der HRV am ersten Messzeitpunkt auf $\Delta$ BSI-GSI . . . . .	51
3.17	Einfluss der HRV am ersten Messzeitpunkt auf $\Delta$ PDS-gesamt . . . . .	51
3.18	Einfluss von $\Delta$ HRV auf $\Delta$ BSI-GSI . . . . .	52
3.19	Einfluss von $\Delta$ HRV auf $\Delta$ PDS-gesamt . . . . .	52
3.20	Veränderung von SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio während und nach The- rapie bei Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe As) . . . . .	53

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Studiendesign und Probandenzahlen . . . . .	25
3.1	Gruppenunterschiede (A/B, C/D) der HRV . . . . .	40
3.2	Änderung der HRV zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt . . . . .	50

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ANCOVA	Kovarianzanalyse
BDNF	<i>Brain-derived Neurotrophic Factor</i>
BSI	<i>Brief Symptom Inventory</i>
BwK	Bundeswehrkrankenhaus
CRH	<i>Corticotropin Releasing Hormon</i>
DIPS	Diagnostisches Interview bei psychischen Störungen
DSM	<i>Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders</i>
EKG	Elektrokardiogramm
EMDR	<i>Eye Movement Desensitization and Reprocessing</i>
GABA	<i>Gamma-Aminobutyric Acid</i>
GSI	<i>Global Severity Index</i>
Hf	Herzschlagfrequenz
HF	<i>High frequency power</i>
HRV	<i>Heart rate variability</i>
ICD	<i>International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems</i>
ISAF	<i>International Security Assistance Force</i>
LF	<i>Low frequency power</i>
LF/HF-Ratio	Verhältnis von <i>Low frequency power</i> und <i>High frequency power</i>
M	<i>Mean</i> ( $\hat{=}$ Mittelwert)
Mini-DIPS	Diagnostisches Kurzinterview bei psychischen Störungen
MZP	Messzeitpunkt
NEO-FFI	NEO-Fünf-Faktoren-Inventar
NN	<i>Normal to normal</i>
PDS	<i>Posttraumatic Stress Diagnostic Scale</i>
PTBS	Posttraumatische Belastungsstörung
PTZ	Psychotraumazentrum der Bundeswehr
RMSSD	<i>Root Mean Square of successive differences</i>
SD	<i>Standard deviation</i> ( $\hat{=}$ Standardabweichung)
SSRI	Serotonin-Wiederaufnahmehemmer
SNRI	Serotonin-Noradrenalin-Wiederaufnahmehemmer
SVF-78	Stressverarbeitungsfragebogen-78
SDNN	<i>Standard deviation of NN intervals</i>

SKID-II	Strukturiertes Klinisches Interview für DSM-IV
TICS	Trierer Inventar zum chronischen Stress
TNF- $\alpha$	Tumornekrosefaktor- $\alpha$
TP	<i>Total power</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

---

# Zusammenfassung

## Einleitung

Soldaten der Bundeswehr werden mandatsbedingt zunehmend mit potentiell traumatisierenden Ereignissen konfrontiert und weisen dadurch ein erhöhtes Risiko auf, an einer Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) zu erkranken. Nur ein Bruchteil der Betroffenen findet konsekutiv den Weg in existente Hilfs-, Behandlungs- und Versorgungssysteme. Vor diesem Hintergrund sollte in der vorliegenden Arbeit, basierend auf Hinweisen der aktuellen Studienlage, die Eignung der Herzfrequenzvariabilität (engl. HRV) als objektivierbarer, biophysio-physiologischer Prädiktor und Therapieverlaufparameter bei deutschen Soldaten beurteilt werden.

## Methodik

Hierzu wurden bei insgesamt 135 Probanden in fünf unterschiedlichen Gruppen, zwei davon mit einsatzbedingter PTBS (As und Aw), eine mit Einsatzerfahrung ohne Erkrankung (B) sowie zwei ohne Einsatzerfahrung mit höherer und moderater chronischer Stressbelastung im Dienst (C und D), die drei HRV-Parameter SDNN (*Standard deviation of NN intervals* als Indikator der Höhe der Gesamtvariabilität), RMSSD (*Root Mean Square of successive differences* als Indikator der Kurzzeitvariabilität und Maß für die Parasympathikusaktivität) und LF/HF-Ratio (Verhältnis von *Low frequency power* und *High frequency power* als Maß des vegetativen Gleichgewichtes) untersucht. Betrachtet wurden Zusammenhänge der HRV mit Stressniveau und Symptomlast (*Global Severity Index* des *Brief Symptom Inventory* (BSI-GSI) und *Posttraumatic Stress Diagnostic Scale* (PDS)) an bis zu drei Messzeitpunkten.

## Ergebnisse

Insbesondere SDNN unterschied sich signifikant zwischen den Probandengruppen A und B sowie C und D ( $\bar{x}(A)=44,87\pm 19,113$ ),  $\bar{x}(B)=54,41\pm 20,149$ ,  $p=0,027$ ;  $\bar{x}(C)=51,74\pm 25,041$ ,  $\bar{x}(D)=68,26\pm 28,593$ ,  $p=0,035$ ). Für die Gruppen A und B wies wiederum SDNN eine positive Korrelation mit der Symptomlast auf (BSI-GSI:  $p=0,003$ , PDS:  $p=0,031$ ). Für selbige Gruppen und den BSI-GSI galt dies mit statistischer Signifikanz auch für RMSSD ( $p=0,025$ ). Für die Gruppe A mit den Untergruppen As und Aw zeigten sowohl SDNN ( $\Delta\bar{x}(As)=15,440\pm 25,3966$ ,  $p=0,034$ ) als auch RMSSD ( $\Delta\bar{x}(As)=18,589\pm 33,2310$ ,  $p=0,048$ )

eine signifikante Zunahme unter Durchführung einer stationären Psychotherapie, während sie ohne Therapie annähernd auf Ausgangsniveau verblieben (SDNN:  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2,090\pm 12,6833$ , RMSSD:  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2,181\pm 10,7813$ ). Die LF/HF-Ratio konnte nur singularär statistisch signifikant zur Auswertung herangezogen werden und scheint im Kontext dieser Arbeit SDNN und RMSSD unterlegen.

## **Schlussfolgerung**

Somit konnten erste Hinweise generiert werden, dass sich insbesondere SDNN zur Diskriminierung zwischen Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS und gesunden einsatzerfahrenen Soldaten sowie zwischen Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit unterschiedlicher chronischer Stressbelastung nutzen lässt. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen weiterhin nahe, dass SDNN, in zweiter Linie auch RMSSD, die Schwere der Symptomlast einer einsatzbedingten PTBS quantifizieren können und sich beide als somatischer Therapieverlaufparameter anbieten könnten.

# Abstract

## Introduction

German soldiers are increasingly confronted with potentially traumatizing events and therefore at increased risk of developing a post-traumatic stress disorder (PTSD). Only a fraction of those affected find their way consecutively to existing support, treatment and care systems. Against this background, based on information from the current study situation, the suitability of heart rate variability (HRV) as an objectifiable, biophysiological predictor and therapy course parameter in German soldiers should be assessed in the present study.

## Methods

For this purpose a total of 135 subjects were examined in five different groups, two of them with deployment-related PTSD (As and Aw), one with deployment experience without illness (B) and two without deployment experience with higher and moderate chronic stress levels (C and D) regarding the three HRV parameters SDNN (Standard deviation of NN intervals as an indicator of the level of overall variability), RMSSD (Root Mean Square of successive differences as an indicator of short-term variability and a measure of parasympathetic activity) and LF/HF ratio (ratio of Low frequency power and High frequency power as a measure of the vegetative balance). The correlations of HRV with stress level and symptom load (Global Severity Index of the Brief Symptom Inventory (BSI-GSI) and Posttraumatic Stress Diagnostic Scale (PDS)) were considered at up to three measurement time points.

## Results

SDNN in particular differed significantly between groups A and B as well as C and D ( $\bar{x}(A)=44.87\pm 19.113$ ),  $\bar{x}(B)=54.41\pm 20.149$ ,  $p=0.027$ ;  $\bar{x}(C)=51.74\pm 25.041$ ,  $\bar{x}(D)=68.26\pm 28.593$ ,  $p=0.035$ ). For groups A and B, SDNN again showed a positive correlation with the symptom load (BSI-GSI:  $p=0.003$ , PDS:  $p=0.031$ ). For the same groups and the BSI-GSI, this was also significant for RMSSD ( $p=0.025$ ). For group A with subgroups As and Aw, both SDNN ( $\Delta\bar{x}(As)=15.440\pm 25.3966$ ,  $p=0.034$ ) and RMSSD ( $\Delta\bar{x}(As)=18.589\pm 33.2310$ ,  $p=0.048$ ) showed a significant increase when inpatient psychotherapy was carried out, whereas they remained approximately at baseline level without therapy (SDNN:  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2.090\pm 12.6833$ , RMSSD:  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2.181\pm 10.7813$ ). The

LF/HF ratio could only be used singularly for the interpretation of data and seems to be inferior to SDNN and RMSSD in the context of this work.

## **Conclusion**

Thus, initial indications could be generated that SDNN in particular can be used to discriminate between soldiers with deployment-related PTSD and healthy soldiers with deployment experience as well as between soldiers without deployment experience with different chronic stress levels. The results of this work further suggest that SDNN, secondly RMSSD, can quantify the severity of the symptom load of an deployment-related PTSD and that both could offer themselves as somatic therapy course parameters.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Im Zuge der zunehmenden Diversität und Intensität der Auslandseinsätze der Bundeswehr, seit deren Beginn Mitte der 1990er Jahre und insbesondere seit Beginn des *International Security Assistance Force*-Mandates (ISAF) in Afghanistan, sind deutsche Soldaten einer zunehmenden Zahl von traumatisierenden Ereignissen ausgesetzt [1].

In diesem Zusammenhang zeigte sich in vorangegangenen Untersuchungen ein erhöhtes Risiko für Bundeswehrsoldaten, die während ihres Auslandseinsatzes mit traumatisierenden Ereignissen konfrontiert wurden, an einer Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) zu erkranken. Die 12-Monats-Prävalenz nach Rückkehr beträgt 2,9 % [1]. Die PTBS ist zwar keine Besonderheit der militärischen Population, so liegt die 12-Monats-Prävalenz außerhalb des Militärs bei 2,4 % [2]. Die Zahl an neudiagnostizierten einsatzbezogenen PTBS-Erkrankungen bei Soldaten, die sich zuvor im Auslandseinsatz befanden, hat jedoch in Relation zum zivilen Sektor einen signifikanten Zuwachs erfahren [3].

Es hat sich allerdings nicht nur die Zahl an Diagnosestellungen erhöht, auch das Inanspruchnahmeverhalten psychiatrischer Hilfsangebote durch Soldaten der Bundeswehr hat zugenommen. Aktuell ist der vom Psychotraumazentrum der Bundeswehr (PTZ) geführten Statistik zu einsatzbedingten psychischen Störungen zu entnehmen, dass von 787 PTBS-Betroffenen, welche aus allen Einsatzgebieten im Jahr 2018 in psychiatrischen Einrichtungen der Bundeswehr vorstellig geworden sind, 182 neuerkrankte Betroffene unter ihnen waren. [3] Bei dieser zwar steigenden Tendenz der Inanspruchnahme herrscht jedoch gegenüber den Zahlen, welche durch die epidemiologischen Daten zur Prävalenz und Inzidenz von einsatzbedingten psychischen Störungen zu erwarten wären, eine Diskrepanz [1]. Aufgrund von Stigmatisierungserleben und Laufbahnaspekten wird ein Großteil der Betroffenen nicht erreicht.

Unter diesen Voraussetzungen wird es neben destigmatisierenden Kampagnen und Maßnahmen zunehmend wichtiger, weitere effiziente und aussagekräftige Marker als Prädiktoren für die Früherkennung und Diagnostik sowie zur Beurteilung des Therapieverlaufes zu identifizieren.

## 1.2 Posttraumatische Belastungsstörung

### 1.2.1 Historischer Kontext

Das Krankheitsbild der PTBS ist insbesondere seit den militärischen Konflikten der Neuzeit in den Fokus von Forschung, Behandlung und Betreuung getreten. Umfassende Destigmatisierungskampagnen, auch innerhalb der Bundeswehr, haben dazu geführt, dass insbesondere deutsche Soldaten Aufmerksamkeit und Umgang erfahren, welche mit dem Schicksal der „Kriegszitterer“ nach dem Ersten Weltkrieg und der nahezu fehlenden Diskussion nach dem Zweiten Weltkrieg [4] nicht zu vergleichen sind.

Beim Krankheitsbild der PTBS sowie sämtlichen nunmehr klassifizierbaren Traumafolgestörungen handelt es sich nun nicht um ein rein militärisch geprägtes Phänomen. So hielten bereits mehrere Autoren innerhalb der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts Erkenntnisse zu den Folgen schwerwiegender Traumatisierungen fest. Hierbei waren insbesondere die Themenkomplexe von Vernachlässigung im Kindesalter und sexualisierter Gewalt zentral [4–6]. Letzterer war und ist zwar zweifellos auch ein potentiell traumatisierender Faktor innerhalb militärischer Auseinandersetzungen, jedoch stellt sich sexualisierte Gewalt auch außerhalb dieser Konflikte als Phänomen innerhalb der Zivilbevölkerung dar. So entwickelte Horowitz durch seine Studien zu basalen kognitiven Verarbeitungsprozessen einen ersten Vorschlag eines posttraumatischen Symptommusters aus Intrusions- und Vermeidungssymptomen sowie subjektiven Schuldgefühlen [4, 7].

### 1.2.2 Diagnose und Klassifikationssysteme

Aus heutiger Sicht ist durch die Forschungsarbeit der letzten Jahrzehnte der allgemein akzeptierte Tenor zu extrahieren, dass traumatische Erfahrungen jedweder Couleur (seien es gewaltvolle Kindheitserfahrungen, sexualisierte Gewalt im Kindes- oder Erwachsenenalter oder Kriegserlebnisse) unabhängig von den genauen Gegebenheiten der auslösenden Extremsituation in einer gemeinsamen Endstrecke in die Symptombilder der Traumafolgestörungen, hierunter auch die PTBS, enden können. Innerhalb der gültigen Diagnosesysteme *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders-5* (DSM-5) und *International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems-10* (ICD-10) (siehe Tabelle 1.1) finden sich in Übereinstimmung fünf Diagnosekriterien einer PTBS:

- das ursächliche Traumaerlebnis
- Wiedererleben
- Vermeidungsverhalten

- physiologisches Hyperarousal
- Dauer der o.g. Symptome für länger als einen Monat

Tabelle 1.1: **ICD-10: Diagnosekriterien der Posttraumatischen Belastungsstörung**  
[8, 9]

---

A. Die Betroffenen sind einem kurz- oder langanhaltenden Ereignis oder Geschehen von außergewöhnlicher Bedrohung oder mit katastrophalem Ausmaß ausgesetzt, das nahezu bei jedem tiefgreifende Verzweiflung auslösen würde.

---

B. Anhaltende Erinnerungen oder Wiedererleben der Belastung durch aufdringliche Nachhallerinnerungen (Flashbacks), lebendige Erinnerungen, sich wiederholende Träume oder durch innere Bedrängnis in Situationen, die der Belastung ähneln oder mit ihr in Zusammenhang stehen.

---

C. Umstände, die der Belastung ähneln oder mit ihr im Zusammenhang stehen, werden tatsächlich oder möglichst vermieden. Dieses Verhalten bestand nicht vor dem belastenden Erlebnis.

---

D. Entweder 1. oder 2.

1. Teilweise oder vollständige Unfähigkeit, einige wichtige Aspekte der Belastung zu erinnern.

2. Anhaltende Symptome einer erhöhten psychischen Sensitivität und Erregung (nicht vorhanden vor der Belastung) mit zwei der folgenden Merkmale:

- a) Ein- und Durchschlafstörungen
  - b) Reizbarkeit oder Wutausbrüche
  - c) Konzentrationsschwierigkeiten
  - d) Hypervigilanz
  - e) erhöhte Schreckhaftigkeit.
- 

E. Die Kriterien B., C. und D. treten innerhalb von sechs Monaten nach dem Belastungsereignis oder nach Ende einer Belastungsperiode auf. (In einigen speziellen Fällen kann ein späterer Beginn berücksichtigt werden, dies sollte aber gesondert angegeben werden).

---

Quelle: Dreßing H. Kriterien bei der Begutachtung der Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS). Hessisches Ärzteblatt 2016;5:271–4.

In beiden Diagnosesystemen können sowohl Gemeinsamkeiten als auch Differenzen identifiziert werden. Jedoch unterscheiden sich die Diagnosekriterien von ICD-10 und DSM-5 nicht unerheblich. Im deutschen Rechtsraum ist die Diagnosestellung mittels ICD-10 bindend und

dementsprechend auch gebräuchlich. Allerdings kann es gerade in schwierigen Fällen ratsam sein, auch die Kriterien des DSM-5 heranzuziehen. Diese sind wesentlich stärker operationalisiert und die resultierende Diagnose dementsprechend besser nachvollziehbar. [8] In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Diagnosestellung einer einsatzbedingten PTBS durch Anwendung der ICD-10, weshalb die Diagnosestellung nach DSM-5 lediglich vergleichend betrachtet wird.

Im Mai 2019 wurde nach langjähriger Entwicklungsarbeit die ICD-11 durch die *World Health Organization* (WHO) verabschiedet und wird voraussichtlich im Januar 2022 in Kraft treten. Innerhalb der mehr als 20 Kategorien psychiatrischer Erkrankungsbilder findet sich in Kapitel 6 Gruppe 7 auch die Diagnose der PTBS (6B40) wieder. Das Symptomcluster stellt sich hierbei durch die drei gleichbleibenden Hauptkategorien Wiedererleben, Vermeidung, Übererregung dar. Es wurde jedoch eine deutlich enger abgesteckte Definition durch die Vermeidung unspezifischer Symptome herbeigeführt. Ebenso kann eine Weiterentwicklung des Traumakriteriums dergestalt festgehalten werden, dass das auslösende Momentum einer PTBS nicht mehr in einem singulären Ereignis beruhen muss und auf den Definitionszusatz „das nahezu bei jedem tiefgreifende Verzweiflung auslösen würde“ [9] verzichtet wurde. Weiterhin wurde die Komplexe PTBS (6B41) in das Diagnosesystem etabliert, die Anpassungsstörung (6B43) neu definiert und die Akute Belastungsreaktion (QE84) aus der Diagnosegruppe entfernt. [10]

### 1.2.3 Kurzbeschreibungen der Diagnosekriterien

#### Trauma

Die Definition eines traumatischen Erlebnisses der Seele ist, abseits ungleich leichter zu definierenden rein körperlichen Verletzungsereignissen, bis zum heutigen Tage uneinheitlich und einem ständigen Wandlungsprozess unterworfen. Bereits 1991 wurde der Begriff des Traumas durch die WHO als „kurz- oder langanhaltendes Ereignis oder Geschehen von außergewöhnlicher Bedrohung mit katastrophalem Ausmaß, das nahezu bei jedem tiefgreifende Verzweiflung auslösen würde“ definiert [11]. Selbiger Wortlaut zur Definition findet sich in der ICD-10 wieder. Im DSM-5 wird der Begriff des Traumas als das Erlebnis von Tod, tödlicher Bedrohung, schwerer Verletzung, angedrohter schwerer Verletzung, sexueller Gewalt oder angedrohter sexueller Gewalt definiert, welche in einer der nachfolgenden Weisen erlebt wurden:

- direkt ausgesetzt
- als Augenzeuge

- indirekte Erfahrung durch traumatische Erlebnisse im o. g. Sinne durch enge Freunde oder Verwandte
- Konfrontation mit Details von traumatischen Ereignissen (z. B. durch beruflichen Kontext oder mediale Verbreitung) [12]

Bei der Definition von Traumata hat sich eine weitere Differenzierung bewährt. So hat sich gezeigt, dass sog. *man-made*-Traumata gegenüber akzidentiellen, also zufälligen, Traumata sowie lang andauernde Typ-II-Traumata gegenüber kurz andauernden Typ-I-Traumata stärker beeinträchtigen und zu einer höheren Rate an Chronifizierung führen können. [13]

## **Wiedererleben**

PTBS-Erkrankte sind im Zusammenhang mit dem traumatisierenden Ereignis in der Folge einem Ausmaße an lebhaften und sich aufdrängenden Erinnerungen und Träumen ausgesetzt, welches als überflutend und belastend erlebt wird. Hierbei werden insbesondere audiovisuelle sowie olfaktorische Qualitäten angesprochen. Prinzipiell kann jedoch jedwede Sinnesqualität angesprochen werden. Das Erleben ist sowohl im wachen Zustand wie auch in Form von Träumen möglich. Letztere können sich als „filmartiges“ Wiedererleben nah am traumatisierenden Ereignis ausrichten, wie auch fiktive Anteile in Prozess des Wiedererlebens einbinden. [13, 14]

## **Vermeidungsverhalten**

Die aus dem nicht kontrollierbaren, überflutenden und belastenden Wiedererleben resultierenden negativen Affektionen der Betroffenen führen unweigerlich dazu, eben jene vermeiden zu wollen. Dies ist auf zwei unterschiedliche Arten möglich:

- **Verhaltensebene:** Von PTBS-Erkrankten werden bewusst oder unbewusst jede Art von Sinneseindrücken oder Situationen, wenn möglich, vermieden, welche an das traumatisierende Ereignis erinnern könnten. Diese stellen sich regelhaft als sog. *Trigger* dar und führen durch die Reizung bzw. Reaktivierung neuronaler Netzwerke im Rahmen des Traumatisierungsprozesses zum Abrufen belastender Gedächtnisinhalte in Form eines bildhaften Wiedererlebens. [13]
- **Ebene von Kognition und Affektion:** Auch keimende Erinnerungen oder deren Bruchstücke werden auf bewusstem oder unbewusstem Wege unterdrückt, um resultierende negative Affektionen zu vermeiden. Aufgrund des geringen bewussten Steuerungseinflusses sind diese Versuche nur selten erfolgreich. Im Falle starker unterbewusster Abwehrmechanismen, z. B. in Form von Verdrängung, können dissoziative Zustände wie

retrograde Teilamnesien resultieren. Es kann sich nur noch sehr unscharf bis garnicht an das als traumatisierend Erlebte erinnert werden. [13]

Weiterhin kann das sog. *Numbing* in die Symptomkategorie der Vermeidung eingeordnet werden. Hiermit ist das Resultat unbewusster Vermeidungsprozesse gemeint, welches sich durch eine Abflachung der allgemeinen Reagibilität Betroffener darstellt. Es wird vom „Gefühl der Gefühllosigkeit“ und in Verquickung von der Entfremdung von anderen Menschen sowie dem allgemeinen sozialen Rückzug gesprochen. [13, 14]

## **Hyperarousal**

Die Reaktionen auf Traumatisierungen beschränken sich, entgegen der überwiegend vorherrschenden Initialwahrnehmung Betroffener, nicht ausschließlich auf die psychologische Ebene. Auch körperliche Symptome stellen eine im Verlauf zunehmende Belastung PTBS-Erkrankter dar. Durch eine dauerhafte und überschießende Aktivierung des autonomen Nervensystems entsteht ein permanenter Anspannungszustand. Ein- und Durchschlaffähigkeit sowie die Schlafqualität werden beeinträchtigt. Eine erhöhte Schreckhaftigkeit (im militärischen Kontext oftmals bei lauten Knallgeräuschen oder im Heimatland untypischen Geräuschen) bedingt eine ausgeprägte Reaktion im Sinne des „*fight-and-flight*-Prinzips“, auch bei objektiv unkritischen Auslösemomenten. Entsprechende traumaassoziierte Situationen rufen sowohl eine stärkere Reaktion hervor, als sie auch, durch eine sensitivierte Wahrnehmung im Rahmen einer Hypervigilanz der Betroffenen, vermehrt wahrgenommen werden. Eine erhöhte Wachsamkeit sowie „*Screening*- und Sicherungsverhalten“ stellen gerade im militärischen Kontext häufig beobachtete Phänomene dar. [13, 14]

In Zusammenhang der physiologischen Übererregung und Stressreaktion werden in der vorliegenden Arbeit klinisch messbare Parameter betrachtet, welche ggfs. eine objektivierbare Beurteilung erlauben werden.

## **Zeitkriterium**

Gemäß ICD-10 und DSM-5 treten die Symptomkriterien Wiedererleben, Vermeidungsverhalten und Hyperarousal innerhalb von sechs Monaten nach dem traumatisierenden Ereignis für mindestens einen Monat auf [9, 12]. Im klinischen Alltag hat sich dieses enge Zeitkriterium durch das Vorliegen sehr individueller zeitlicher Verläufe sowie Hemmnisse in der Symptomwahrnehmung Betroffener als nicht vollumfänglich praktikabel erwiesen. Innerhalb beider Diagnoseklassifikationssysteme ist somit auch die Möglichkeit einer PTBS mit verzögertem Beginn festgehalten. Oft treten erste Symptome bereits unmittelbar oder mit kurzer zeitlicher Latenz nach dem traumatisierenden Ereignis auf (sog. Brückensymptome), das Vollbild

wird jedoch auch in einigen Fällen erst nach Monaten bis Jahren erreicht. Hierbei spielen die individuelle Ressourcenlage und Resilienz eine maßgebliche Rolle.

#### **1.2.4 Traumafolgestörungen**

In beiden Diagnosesystemen wird die Diagnose PTBS in den Kontext weiterer Traumafolgestörungen eingeordnet. Die Symptomkomplexe stellen sich als teilweise überschneidend dar, weshalb systemunabhängig eine genaue Prüfung des vollständigen Erfüllens der Diagnosekriterien unabdingbar erscheint. Direkte Konsequenzen unscharf gestellter Diagnosen finden sich für die PTBS-Erkrankten im Spektrum der therapeutischen Möglichkeiten. Weiterhin erlangt die valide Diagnosestellung spätestens im Kontext gutachterlicher Fragestellungen eine nicht unerhebliche Bedeutung.

Innerhalb der ICD-10 wird die PTBS mit der Codierung F43.1 in den Kontext der Traumafolgestörungen eingeordnet. Als verwandte Störungsbilder stellen sich die Akute Belastungsreaktion (F43.0), die Anpassungsstörung (F43.2) sowie die Andauernde Persönlichkeitsänderung nach Extrembelastung (F62.0) dar. Die Störungsbilder, an denen traumatische Erlebnisse kausal beteiligt sind, stellen sich jedoch deutlich mannigfaltiger dar. Zu nennen sind hier: Dissoziative Störungsbilder (F44), die Somatoforme Schmerzstörung (F45.4), die Dissoziale Persönlichkeitsstörung (F60.2), die Emotional Instabile Persönlichkeitsstörung (Borderline-Typ) (F60.3), Essstörungen (F50), Affektive Störungen (F32, 33, 34), Substanzabhängigkeiten (F1) sowie Somatoforme Störungen (F45) [15]. Auch innerhalb des DSM-5 wird die PTBS nunmehr, gemeinsam mit der Akuten Belastungsreaktion und der Anpassungsstörung, in den Kontext der trauma- und stressbedingten Störungen eingeordnet. Noch im DSM-IV wurde die PTBS als Angststörung klassifiziert.

#### **1.2.5 Epidemiologische Einordnung der Posttraumatischen Belastungsstörung und Traumafolgestörungen im zivilen sowie militärischen Kontext**

In der bis dato weltweit größten epidemiologischen Studie [16] gaben 60 % der Befragten einer repräsentativen Stichprobe der US-Bevölkerung an, mindestens einmalig ein traumatisches Erlebnis im Sinne der o. g. Definition erlebt zu haben. Von den Betroffenen entwickelten jedoch lediglich 8 % der Männer sowie 20 % der Frauen die Diagnose einer PTBS. [17] Es können sowohl individuelle Einflussfaktoren wie Alter und Geschlecht als auch ein Einfluss der bereits beschriebenen Unterschiede der Traumata (kurz- und langandauernd, *man-made* und akzidentiell) angenommen werden. So entwickeln nach einer Vergewaltigung mehr als 90 % der Betroffenen eine Akute Belastungsstörung, ca. 50 % eine manifeste PTBS [18]. Bei

akzidentiellen Traumata hingegen finden sich deutlich niedrigere Erkrankungsraten [16]. [11] Erhöhte Erkrankungsraten finden sich weiterhin in Risikopopulationen, wie Soldaten. Die Zahlen reichen bis zu 11,3 % in einem Screening auf psychische Gesundheit auffälliger amerikanischer Soldaten, die aus dem Afghanistankrieg zurückkehrt sind, bis zu 19,1 % amerikanischer Irakheimkehrer [19]. Die PTBS-Prävalenz amerikanischer Soldaten liegt je nach Einsatzort bei 9 bis 20 % [20–24], bei englischen Soldaten mit Einsätzen im Irak und in Afghanistan mit 4 % deutlich niedriger [25]. Für deutsche Soldaten nach Rückkehr aus dem Einsatz konnte eine 12-Monats-Prävalenz einer PTBS von 2,9 % nachgewiesen werden, wobei auch innerhalb militärischer Populationen Einflussfaktoren, wie Einsatzort, Truppenzugehörigkeit und Geschlecht zum Tragen kommen [1]. Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass sich epidemiologische Daten zur PTBS im zivilen sowie militärischen Kontext nur schwerlich in ein homogenes Gesamtbild einordnen lassen.

### **1.2.6 Physiologie des Symptomstress im Rahmen der Posttraumatischen Belastungsstörung**

Stressbelastung bei PTBS-Erkrankten zeigt sich in einer umfassenden Dysregulation der neuroendokrinen, neuroanatomischen und neurochemischen Systeme. Auf der neuroendokrinen Achse führen ein zentraler Hyperkortisolismus und eine anhaltende Erhöhung des Corticotropin-Releasing-Hormons (CRH) zu verstärkter Encodierung traumatischer Erlebnisse, einer verstärkten organischen Antwort auf Stress sowie einer Atrophie des Hippocampus. Diese bedingt wiederum, gemeinsam mit einer vermehrten Aktivität der Amygdala sowie einem verminderten Volumen v. a. des präfrontalen Cortex sowie des Cingulums, eine veränderte Stressreaktion und eine verminderte Inhibition von Furchtreaktionen auf der neuroanatomischen Achse. Als dritte Achse in diesem vielverschalteten und komplexen System ist die neurochemische zu nennen. Hier führen vor allem eine Dysregulation des serotonergen und adrenergen Systems zu einer gestörten Balance zwischen Amygdala und Hippocampus, einer vermehrten Angespanntheit, unterdrückten anxiolytischen Effekten sowie Vigilanz-, Impulsivitäts- und memoraler Intrusionssteigerung. Der Aminosäure- und Peptidhaushalt wiederum bedingen eine verstärkte Reaktionen auf exogene und endogene Stressoren sowie Dissoziation und Derealisation. Insbesondere das adrenerge System fördert neben der psychischen Symptomatik auch die vegetative Reaktion des Organismus in Form vermehrter Anspannung, einer beschleunigten Herzfrequenz und Blutdruckanstieg. [26–28]

Das autonome Nervensystem ist in zwei Punkten von dieser komplexen Dysregulation auf neurobiologischer Ebene betroffen [29]. Erstens verändert sich die Grundspannung [30] und zweitens die Reaktion des Organismus auf exogene und endogene Stressoren [31]. Diese Inbalance ist allerdings nicht beschränkt auf das Krankheitsbild der PTBS. Sie zeigt sich sowohl bei weiteren psychischen Erkrankungen wie der Schizophrenie, Bipolarität, Major

Depression [32], Angst- und Panikstörungen [33, 34] als auch bei diversen körperlichen Erkrankungen, wie Herz-Kreislaufkrankungen, Diabetes mellitus [35], Schilddrüsenerkrankungen [36, 37], neurodegenerativen Erkrankungen, chronischen Nierenerkrankungen [38] sowie diversen Arten von Medikation [39].

## 1.3 Stress

Auch unabhängig von Auslandseinsätzen und Erkrankungen sind bei Soldaten der Bundeswehr verschiedenste Stressoren wirksam und bedingen ein unterschiedliches Stressniveau [40]. Stress ist dabei per definitionem ein mannigfaltiger und zwangsläufig nur in seinem Bedeutungszusammenhang interpretierbarer Begriff. Auf die Definition von Stress als „*fight-and-flight*-Reaktion“ nach Walter B. Cannon von 1915, in welcher Stress als adrenerge-notadrenerge Notfallreaktion beschrieben wurde [14], definierte Hans Selye jenen als nicht-spezifische Reaktion des Körpers auf jede beliebige Art von Anforderung [41]. Auch postulierte bereits Selye pathologische Folgen für den Organismus bei chronischer Stressbelastung. Zur gesonderten Betrachtung sollte Stress in die Zeitfaktoren akut und chronisch unterteilt werden [42, 43]. Akuter Stress ist hierbei als Belastung zu verstehen, die als Auslöser plötzlich auftritt, rasch verschwindet und Bewältigungsmechanismen des Organismus initiiert. Chronischer Stress hingegen besitzt einen eher schleichenden Beginn und ist mit dem alltäglichen Leben verbunden [40]. Das Spektrum potentieller chronischer Stressoren bei Soldaten ist vielfältig. Insbesondere Belastung durch regelhaftes Pendeln, häufige ausbildungs- sowie einsatzbedingte Abwesenheiten und somit die Trennung von Familie und sozialem Umfeld, aber auch eine zunehmende Arbeitsverdichtung, stellen alltägliche Herausforderungen für das militärische Klientel dar. Zur weiteren Differenzierung empfiehlt sich eine qualitative Unterscheidung in Stress bei Nichtvorliegen einer aktuellen Erkrankung z. B. durch ein erhöhtes Maß an Arbeitsbelastung und Symptomstress, welcher in direktem kausalen Zusammenhang zur vorliegenden Erkrankung steht [44].

Auch im Rahmen von Stressexposition ohne Vorliegen einer manifesten psychiatrischen Erkrankung kommt es zu Veränderungen verschiedener endokrinologischer und neurologischer Systeme. Hierbei sind insbesondere das Locus-coeruleus-System, das Noradrenalin-System als Teil des sympathisch-parasympathischen Nervensystems und die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse von Bedeutung [14, 28]. Eine Schlüsselrolle in dieser Systemverschaltung spielt das autonome Nervensystem, bestehend aus Sympathikus und Parasympathikus. In der klassischen Sichtweise wurde davon ausgegangen, dass beide als Antagonisten fungieren: Als eindimensionale Kontroll- und Einflussfaktoren der autonomen Aktivität würde eine Abnahme der sympathischen Aktivität eine automatische Zunahme der parasympathischen Aktivität bedeuten und umgekehrt [14]. Die prägende Bezeichnung

in diesem Zusammenhang ist die „sympathovagale Balance“ [45], welche als biologischer Parameter für die Stressregulationsfähigkeit gilt [14]. Die antagonistische Sichtweise wurde durch das Modell des „*autonomic space*“ [46] mit der Beschreibung zweier unabhängiger Achsen des autonomen Nervensystems (sympathisch und parasympathisch) sowie drei verschiedenen Modi (reziprok, koaktiv und unverknüpft) deutlich erweitert [14]. Die Aktivität der jeweiligen autonomen Komponenten und somit die sympathovagale Balance kann jedoch weiterhin als Ausdruck der Stressregulationsfähigkeit angesehen werden. Die autonome Regulationslage kann als globaler Indikator für das Ausmaß psychophysischer Anpassungs- und Regulationsfähigkeit gesehen werden [14]. Ein potentieller Marker der autonomen Balance ist die Herzfrequenzvariabilität (engl. HRV) mit ihren verschiedenen Parametern. Diese wird im Folgekapitel genauer beschrieben und soll die zentrale Betrachtung in dieser Arbeit darstellen.

Kurzfristige Auswirkungen von Stress auf den Organismus sind als adaptive Reaktion auf den jeweiligen Stressor zu werten. Kommt es jedoch zu einer prolongierten, chronischen Stressexposition, folgt eine andauernde Inbalance der genannten Systeme mit körperlichen sowie psychischen Folgeschädigungen. So werden u. a. Depressionen [47], Störungen des Stoffwechsels mit Übergewicht und Insulinresistenz [48], ein supprimiertes Immunsystem [49] und Herz-Kreislauf-Erkrankungen [50] mit einer chronischen Stressbelastung in Verbindung gebracht. Am Herzen kommt es zu einem vermehrten Auftreten von Rhythmusstörungen, Endotheldysfunktionen durch Arteriosklerose, chronischen Gefäßverengungen im Rahmen einer Koronaren Herzkrankheit und Myokardischämien [51].

Während das Phänomen Stress in den letzten Jahren und Jahrzehnten in vielerlei Hinsicht ausgiebig und differenziert untersucht wurde, fand das spezielle Thema der Stressverarbeitungsfähigkeit und Stressresistenz deutscher Soldaten bisher wenig Niederschlag. In stattgehabten Untersuchungen wurde bisher überwiegend versucht, Stress anhand von Selbstauskünften zu erfassen [40, 52]. Eine wichtige Möglichkeit der Datenerhebung zur Erfassung der Auswirkungen von Belastungssituationen sind objektivierbare Beanspruchungsmessungen. Hierzu kann u. a. die HRV mit ihren verschiedenen Parametern genutzt werden. Bislang ist ein potentieller Zusammenhang der HRV und verschiedenen Stressniveaus bei Soldaten der Bundeswehr nur wenig betrachtet worden oder es konnten keine belastbaren Ergebnisse generiert werden [53], weshalb auch dieser Aspekt in der vorliegenden Arbeit abgebildet werden soll.

## 1.4 Herzfrequenzvariabilität

Unter Belastung körperlicher wie psychischer Ausprägung ändert sich die Herzfrequenz (Hf) eines Individuums. Diese kann somit als Ausdruck der Adaption des Organismus an die

jeweilige Belastung gesehen werden. Die Hf bezeichnet die Anzahl stattgehabter Kontraktionen des Herzmuskels pro Minute. Sie spiegelt somit die aktuelle Belastung des Individuums bzw. dessen Kreislaufes wieder und wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Im Unterschied zur Hf wird die Pulsfrequenz peripher gemessen. Im Falle ineffizienter Herzkontraktionen (z. B. bei verschiedenen Formen von Herzrhythmusstörungen) kann es zu einer Differenz von Herzschlagfrequenz und Pulsfrequenz kommen. Diese wird Pulsdefizit genannt. Die Herzfrequenzvariabilität vereint neben diesen beiden singulären Markern des Belastungsmaßes verschiedene mathematisch berechnete Parameter. Diese kennzeichnen die Varianz, Rhythmik und Komplexizität aufeinanderfolgender Herzaktionen. Genauer wird durch die HRV die physiologische Schwankungsbreite von R-Zacke zu R-Zacke eines Elektrokardiogramms (EKG) beschrieben. [35]

### 1.4.1 Physiologie der Herzfrequenzvariabilität

Auch bei gleichbleibender Belastung ist die Hf und somit der Abstand von R-Zacke zu R-Zacke im EKG einer physiologischen Schwankungsbreite unterworfen. Das primäre taktgebende Erregungsbildungszentrum des Herzens ist der Sinusknoten. Er wird in seiner Eigenfrequenz durch das autonome Nervensystem, bestehend aus Sympathikus und Parasympathikus, beeinflusst. Das Zusammenspiel beider Anteile bedingt die Schwankungsbreite der *normal-to-normal*-Intervalle (NN-Intervalle). So führt eine durch den Sympathikus vermittelte Noradrenalinfreisetzung zu einer Reduzierung der HRV, eine durch den Parasympathikus vermittelte Acetylcholinfreisetzung zu einer Erhöhung der HRV [54]. Bei geringer Belastung, also im Ruhezustand des Individuums, überwiegt in diesem Zusammenspiel der parasympathische Anteil. Die physiologische Schwankungsbreite der HRV ist weniger eingeschränkt, die Unterschiede in den Abständen der NN-Intervalle sowie die Variabilität der zeitlichen Abstände von Herzschlagaktionen nehmen zu und somit auch die HRV. Sie kann damit als potentieller Marker für die Balance, aber auch die Inbalance des autonomen Nervensystems angesehen werden. [35]

Insbesondere kann die Analyse von HRV-Parametern dazu dienen, die Einflüsse des autonomen Nervensystems unter verschiedenen Belastungen des Organismus differenzierter zu beurteilen [35, 55]. Die autonome Aktivität lässt sich hierbei vor allem durch die Analyse rhythmischer Schwankungen der Herzschlagfolge quantifizieren [35]. Schnelle Schwankungen sind eng mit der Atmung assoziiert und werden überwiegend vom parasympathischen Anteil des autonomen Nervensystems moduliert, langsamere Schwankungen hingegen werden sowohl vom sympathischen als auch vom parasympathischen Anteil beeinflusst [56]. Zwar spricht somit eine erhöhte HRV für eine verbesserte Fähigkeit, sich auf Stressoren einzustellen und mit ihnen umzugehen [38] sowie eine verminderte HRV im Gegenzug für eine eingeschränkte Fähigkeit des Organismus auf Belastungen adäquat zu reagieren. Jedoch

muss beachtet werden, dass neben diesem primären Endergebnis autonom kardialer Effekten auch „andere modulierende Faktoren wie körperliche Belastung, Hitze und weitere Umweltbedingungen Einfluss besitzen“ [35].

### 1.4.2 Parameter der Herzfrequenzvariabilität und deren Analyse

Für die Analyse der HRV müssen zuvor die Abstände der NN-Intervalle gemessen werden. Dies ist sowohl mit stationären als auch portablen Geräten möglich. Zu den mobilen Messinstrumenten gehören u. a. 24h-EKG-Geräte, Brustgurte und im Spektrum der technischen Weiterentwicklung mittlerweile auch Pulsuhren mit ausreichend validen Messergebnissen. Die Dauer der Messperiode sollte für eine belastbare Messung möglichst lang sein, das Spektrum reicht hier jedoch von weniger als einminütigen Messungen über fünfminütige Kurzzeitmessungen bis zu Langzeit-Messungen über 24 Stunden und mehr. Für einige HRV-Parameter stellt sich eine 24h-Messung als obligat dar. Je nach Fragestellung und Setting können jedoch auch Kurzzeitmessungen geeigneter sein (z. B. bei kurzfristigen Belastungsänderungen am Arbeitsplatz). Für die Analyse der HRV stellt sich eine sog. „beat-to-beat-Aufzeichnung“ [35] als sinnvoll dar. Bei einer hohen Abtastrate von idealerweise 1000 Hz (also auf die Millisekunde genaues Abtasten des EKG-Signals) werden alle Herzaktionen erfasst, um auch die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Herzaktionen möglichst differenziert beurteilen zu können. Zur Qualitätssicherung sollte zum Ausschluss von Herzrhythmusstörungen ein Ruhe-EKG abgeleitet sowie eine Artefaktkontrolle (visuell oder automatisiert) durchgeführt werden. Eine zumindest kritische Beurteilung sollte für Aufzeichnungen mit  $> 1\%$  ventrikulären oder supraventrikulären Extrasystolen erfolgen. Die Anfertigung einer Ruhe-HRV-Analyse ermöglicht zudem die Berücksichtigung einer ausgeprägten interindividuellen Variabilität sowie des Einflusses zahlreicher exogener und endogener Faktoren, die für den Zeitraum der Messung in der Regel nicht beeinflusst werden können. Beachtet werden sollte zu Beginn der Untersuchung weiterhin eine je nach Belastungsänderung längere oder kürzere Phase des Einschwingens zur Berücksichtigung der Aktivität autonomer Regelkreise. [35]

Mittels interner oder externer Analysesoftware erfolgt die Quantifizierung der HRV. Diese kann mittels Methoden des Zeit- oder Frequenzbereiches und mit Methoden der nicht-linearen Analyse erfolgen (siehe Tabelle 1.2). Bei Analysen des Zeitbereiches wird in statistische und geometrische Methoden unterteilt. [35] Bei den statistischen Methoden werden die gemessenen NN-Intervalle hinsichtlich ihrer Varianz ausgewertet, bei den geometrischen Methoden erfolgt die Bewertung der HRV anhand geometrischer Formen wie „z. B. Balkendiagramme, HRV-Dreiecksindizes und seine Modifikationen, dreieckige/dreischenklige Interpolationen des NN-Intervall-Balkendiagramms [57]“ [35]. Auch bei den Analysen des

Frequenzbereiches werden verschiedene Verfahren unterschieden. Hierzu zählen "die Verfahren der Fast Fourier-Transformation, der Autoregression [58], das Zero-Crossing-Verfahren, die Wavelet-Analyse [59] und die trigonometrisch regressive Spektralanalyse [60, 61]" [35]. Bei den verbreitetsten Verfahren aus dem Frequenzbereich (Fast Fourier-Transformation und Autoregression) „werden die rhythmischen und nicht-rhythmischen Schwankungen der NN-Intervallreihen im Rahmen einer Spektralanalyse in frequenzabhängige Oszillationen umgewandelt“ [35]. Hierdurch wird die Trennung der NN-Intervallreihen und der periodischen Oszillationen des Herschlages ermöglicht, sodass verschiedene physiologische Einfluss- und Regelfaktoren [60] abgebildet werden können [35]. Weitere Methoden, welche in der Analyse der HRV Anwendung finden, sind das Spektralanalyseverfahren Lomb-Algorithmus, die auf dem gleichen Prinzip beruhende TRS-Technik sowie Methoden der nichtlinearen Dynamik (z. B. Approximierte Entropie, Sample Entropy, Detrended Fluctuation Analysis). Letztere erfassen jedoch weniger die Stärke der HRV sondern mehr qualitative Aspekte der NN-Intervallreihe [62]. [35] Das sog. Poincaré-Plot stellt in Form einer Punktwolke die NN-Intervallreihen dar. Hierdurch können sowohl bestimmte Indizes ermittelt und interpretiert werden als auch die Ableitung bestimmter Krankheitsbilder erfolgen [63]. [35] Die Anwendung der beschriebenen Methoden ist auf unterschiedliche Weise möglich. Die überwiegend mathematisch geprägten Methoden können bei der Analyse des Zeitbereiches durch jegliche Form von Tabellenkalkulation erfolgen. Weiterhin bieten in vielen Fällen bereits die Hersteller entsprechender EKG-Geräte Softwarelösungen zur Berechnung von HRV-Parametern des Zeit- und Frequenzbereiches, sowie zur Anwendung nichtlinearer Analysemethoden. [35] Um Aussagen zum autonomen Nervensystem treffen zu können, müssen geeignete HRV-Parameter entsprechend der zu untersuchenden Hypothesen ausgewählt und in einem für diesen Parameter geeigneten Zeitintervall analysiert werden. Hierbei ist schon bei der Auswahl zu beachten, ob primär ein Einfluss des Sympathikus oder des Parasympathikus gemessen werden soll. Es wurden bisher jedoch keine allgemeingültigen Grenzwerte für HRV-Parameter definiert. Eine Interpretation von Einzelwerten sollte dementsprechend nur in Kombination mit klinischen Informationen und Untersuchungsergebnissen sowie weiteren Instrumenten wie z. B. psychometrischen Fragebögen und in Längsschnittuntersuchungen erfolgen. [35]

Tabelle 1.2: Häufig genutzte HRV-Parameter [27]

<b>Zeitbezogene Parameter</b>	
SDNN	<i>Standard deviation of NN intervals</i> : Indikator der Gesamtvariabilität, keine klare Zuordnung zu Sympathikus/Parasympathikus
RMSSD	<i>Root Mean Square of successive differences</i> : Indikator der Kurzzeitvariabilität, Zuordnung zum Parasympathikus
NN 50	Indikator der Spontanvariabilität, Zuordnung zum Parasympathikus
<b>Frequenzbezogene Parameter</b>	
TP	<i>Total power</i> : Indikator der Gesamtvariabilität, keine klare Zuordnung
LF	<i>Low frequency power</i> : Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,04 bis 0,15 Hz; Zuordnung zum Sympathikus und Parasympathikus, wobei der Anteil des Sympathikus überwiegt
HF	<i>High frequency power</i> : Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15 bis 0,40 Hz, Zuordnung zum Parasympathikus
LF/HF	Quotient der sympatho-vagalen Balance; gilt als Wert des Zusammenspiels von Parasympathikus (HF) und Sympathikus (LF), je höher der Quotient, desto höher ist die sympathische Aktivität
<b>Nicht-lineare Parameter</b>	
SD1	Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser bei einem Poincaré-Plot, Indikator der Kurzzeitvariabilität, Zuordnung zum Parasympathikus
SD2	Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser bei einem Poincaré-Plot, Indikator der Langzeitvariabilität, Zuordnung zum Sympathikus und Parasympathikus

Quelle: Sammito S, Thielmann B, Zimmermann P und Böckelmann I. Einfluss einer post-traumatischen Belastungsstörung auf die Herzfrequenzvariabilität als Marker des autonomen Nervensystems - eine systematische Literaturübersicht. Fortschritte der Neurologie Psychiatrie 2015;83:30–7.

### 1.4.3 Herzfrequenzvariabilität im Kontext physischer und psychischer Beanspruchung und Morbidität

Die HRV hat bereits seit längerer Zeit eine Etablierung zur Beurteilung der physischen Belastung beim Gesunden erfahren [35]. Hierbei liegt der Mehrwert der HRV gegenüber der reinen Hf insbesondere in dem „zumindest unter standardisierten Bedingungen nachweisbaren Zusammenhang zwischen HRV-Parametern und metabolischen und respiratorischen Beanspruchungsindikatoren, dem mehrphasigen Verlauf bei progressiver Belastungssteigerung unter standardisierten Bedingungen und dem Erholungsverhalten nach unterschiedlichen Belastungsintensitäten [64, 65]“ [35]. Ebenfalls wurden Zusammenhänge zwischen einer veränderten HRV und somatischen Erkrankungen bereits ausführlich untersucht [36–39, 66–68] und an verschiedenen Schnittpunkten von Diagnostik und Behandlung etabliert.

Auch im Rahmen psychischer Belastungen finden sich Veränderungen der HRV [69–76]. Gemäß den vorangehenden Ausführungen kann die HRV insbesondere zur Beurteilung der vegetativen Balance herangezogen werden. Abseits manifester psychiatrischer Erkrankungen, so z. B. durch unterschiedliche Stressbelastungen, können psychische Belastungen nur eingeschränkt objektiviert werden. An dieser Stelle kann die HRV als Indikator psychophysischer Belastungszustände des Organismus und als Marker von Einschränkungen der Adaptations- und Anpassungsfähigkeit für biopsychosoziale Fragestellungen herangezogen werden [35]. Die Studienlage stellt sich hinsichtlich Methodik, Probandenklientel und Untersuchungsgegenstand äußerst divergent dar. Eine Betrachtung der HRV als Stressparameter im militärischen Kontext kann zwar ebenfalls verzeichnet werden [77–79], ein Übertrag der Ergebnisse auf Bundeswehrsoldaten mit unterschiedlichen Stressniveaus ist mit der bisherigen Studienlage jedoch nicht möglich und soll auch deshalb in dieser Arbeit mit betrachtet werden.

Ebenfalls bereits Gegenstand verschiedener Studien war der Zusammenhang der HRV und psychischen Erkrankungen, eingeschlossen der PTBS [27, 31–33, 80–89]. In einer systematischen Übersichtsarbeit zum Zusammenhang von PTBS und reduzierter HRV konnten Sammito et al. (2015) an insgesamt 9 von 15 eingeschlossenen Studien einen signifikanten Einfluss und an weiteren 3 Studien einen zumindest tendenziellen Einfluss einer PTBS auf die Reduktion der HRV zeigen [27]. Im Rahmen von PTBS-Erkrankung kommt es zu einer umfassenden Dysregulation mehrerer physiologischer Regulationssysteme, welche bereits in vorangegangenen Abschnitten beschrieben wurden. Insbesondere mit den Veränderungen der neuroendokrinen und neurochemischen Systeme (z. B. ein zentraler Hypocortisolismus, erhöhte Spiegel an CRH und eine erhöhte noradrenerge Aktivität, sowie der Verlust regulatorischer Wirksamkeit von GABAergen (*gamma-aminobutyric acid-ergic*) und serotonergen Systemen) ist eine gestörte parasympathische-sympathische Balance des vegetativen Nervensystems assoziiert [29]. [27] Hierbei ist die Erfassung des autonomen Gleichgewichts bei PTBS-Erkrankten mit der HRV möglich. Eine hohe HRV (hohe Schwankung der

NN-Intervalle) ist zumeist mit einer ausgeprägten parasympathischen Grundaktivität verbunden, eine reduzierte HRV (eingeschränkte bzw. geringe Schwankung der NN-Intervalle) zumeist mit einer erhöhten sympathischen Grundaktivität. Somit wäre die Reduktion der HRV im Rahmen einer PTBS als verstärkte Aktivität des Sympathikus im Zusammenspiel des autonomen Nervensystems anzusehen.

Allerdings ist die bisherige Studienlage noch nicht ausreichend, um die HRV als physiologischen Parameter für die klinische Diagnostik oder im Laufe einer Therapie zu nutzen. Hierbei schränken besonders methodische Limitation wie z. B. fehlende Ausschlusskriterien (u. a. somatische Grunderkrankungen, Medikation), geringe Fallzahlen in den Probandengruppen, bislang nicht stattgehabte Fokussierung auf militärische Populationen, eine große Heterogenität hinsichtlich des PTBS-auslösenden Ereignisses, der nur spärlich betrachtete Zusammenhang der HRV-Veränderung und der Symptomlast der PTBS sowie der unterschiedlichen Länge der Messintervalle die Aussagekraft der bisherigen Studienergebnisse ein [27]. Darüber hinaus stellen sich die Probandengruppen der bisher stattgehabten Studien als sehr heterogen dar. Die ebenfalls vorliegende Heterogenität hinsichtlich der ausgewählten Parameter als auch der zu Grunde liegenden Messverfahren bedingt eine eher eingeschränkte Aussagekraft und Vergleichbarkeit der bisherigen Studienergebnisse.

#### **1.4.4 Zielsetzung dieser Arbeit**

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit vorrangig zwei übergeordnete Ziele verfolgt: Zum Ersten sollten speziell für militärische Probandengruppen mit unterschiedlichen Niveaus von dienstlicher Belastung sowie mit und ohne Vorliegen einer einsatzbedingten PTBS Unterschiede der HRV als physiologischem Marker der Stressbelastung festgestellt werden. Hierzu wurden die Messung dreier HRV-Parameter (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) sowie psychometrische Testungen als Gradmesser allgemeiner Stressbelastung und zur Quantifizierung der Symptomlast durchgeführt.

Wie bereits vorangehend ausgeführt erlauben die unterschiedlichen HRV-Parameter mit den ihnen zu Grunde liegenden mathematischen Methoden die Betrachtung verschiedener Teilbereiche des vegetativen Nervensystems. Durch die Parameterauswahl dieser Arbeit sollte mit der Abbildung der Gesamtvariabilität (SDNN), eher parasympathischer Aktivität (RMSSD) und der Aktivitätsgewichtung sympathischer wie parasympathischer Aktivität (LF/HF-Ratio) eine differenzierte Grundlage für die spätere Ergebnisinterpretation ermöglicht werden. Die Auswahl orientierte sich hierbei einerseits am Konsens der vorliegenden Literaturempfehlungen [35, 55] sowie an bereits stattgehabten Studien, insbesondere jenen mit ebenfalls gegebenem Untersuchungsfokus einer PTBS, um eine Vergleichbarkeit und Einordnung in den Literaturkontext zu ermöglichen.

Anhand der Ergebnisse sollte die HRV als Differenzierungsmerkmal unterschiedlicher Stressniveaus bei psychisch Gesunden sowie als Prädiktor und Gradmesser der Symptomlast für einsatzbedingt psychisch erkrankte Bundeswehrsoldaten beurteilt werden. Zum Zweiten wurden in einem longitudinalen Design die gleichen Parameter zu zwei Messzeitpunkten vor und nach einer stationären Traumatherapie (bzw. vor und nach einem vergleichbaren Warteintervall ohne Traumatherapie) sowie katamnestisch zu einem dritten Messzeitpunkt für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS erhoben. Hieraus sollten potentielle Verlaufs- und Erfolgsparameter stationärer Psychotherapie von Soldaten hergeleitet werden.

Ziel dieser Fragestellungen war es, die HRV als objektivierbaren Marker der Stressbelastung, der Symptomlast einer einsatzbedingten PTBS sowie als Therapieverlaufsparameter zu beurteilen.

## 1.5 Hypothesen

Für die Entwicklung der konkreten Fragestellungen des Quer- und Längsschnittteils dieser Arbeit galten folgende Hypothesen als Grundlage:

- Die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe A) unterscheiden sich signifikant von den HRV-Werten der Gesunden (Gruppe B): Soldaten mit einsatzbedingter PTBS zeigen eine signifikant reduzierte HRV (entspricht reduzierter SDNN bzw. RMSSD bzw. einer erhöhten LF/HF-Ratio). (1. Messzeitpunkt)
- Die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) für Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung (Gruppe C) unterscheiden sich signifikant von jenen mit moderater chronischer Stressbelastung (Gruppe D): Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung zeigen eine signifikant reduzierte HRV (entspricht reduzierter SDNN bzw. RMSSD bzw. einer erhöhten LF/HF-Ratio). (1. Messzeitpunkt)
- Die Veränderung der HRV-Parameter (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) zum zweiten Messzeitpunkt für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS unter Therapie (Gruppe As) ist stärker als jene für Soldaten in der Wartegruppe ohne Therapie (Gruppe Aw): Soldaten mit einsatzbedingter PTBS mit Therapie zeigen eine signifikant gebesserte HRV (entspricht gesteigerter SDNN bzw. RMSSD bzw. einer reduzierten LF/HF-Ratio). (1. und 2. Messzeitpunkt)
- Es zeigt sich eine kontinuierliche Zunahme (SDNN, RMSSD) bzw. Abnahme (LF/HF-Ratio) der HRV im Sinne eines Therapieerfolgs vom ersten zum dritten Messzeitpunkt

für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in Therapie (Gruppe As). (1., 2. und 3. Messzeitpunkt)

- Es besteht ein Zusammenhang zwischen den HRV-Parametern (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) und der Symptomlast einsatzerfahrener Soldaten (Gruppe A und B): eine höhere Symptomlast korreliert mit einer erniedrigten HRV (entspricht reduzierter SDNN bzw. RMSSD bzw. einer erhöhten LF/HF-Ratio). (1. Messzeitpunkt)
- Es besteht ein Zusammenhang zwischen den HRV-Parametern (SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio) und der subjektiven Belastung auch für einsatzunerfahrene Soldaten (Gruppe C und D): eine höhere Belastung korreliert mit einer erniedrigten HRV (entspricht reduzierter SDNN bzw. RMSSD bzw. einer erhöhten LF/HF-Ratio). (1. Messzeitpunkt)

## 1.6 Fragestellungen

Für die statistische Auswertung wurden auf Grundlage der aufgestellten Hypothesen Fragestellungen getrennt nach Querschnitts- und Längsschnittteil entwickelt.

### 1.6.1 Querschnittsteil

Für den Querschnittsteil gab es drei Hauptfragestellungen:

1. Gibt es bezüglich der HRV Unterschiede zwischen Soldaten mit unterschiedlichen Belastungen, zum einen zwischen Gruppen A und B, zum anderen zwischen Gruppen C und D?
2. Kann man mit der HRV die Gruppenzugehörigkeit vorhersagen?
3. Welche der HRV-Parameter korrelieren mit der Symptomlast, ebenfalls bei getrennter Betrachtung der Gruppen A und B sowie C und D?

### 1.6.2 Längsschnittteil

Für den Längsschnittteil bezog sich die Hauptauswertung auf die Änderungen zwischen den ersten beiden Messzeitpunkten. Dabei gab es folgende Hauptfragestellung:

1. Korrelieren in Gruppe A die HRV-Parameter oder deren Änderung (zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt) mit der Änderung in der Symptomlast? Gibt es dabei Unterschiede zwischen den Untergruppen As und Aw?

# 2 Material und Methodik

## 2.1 Studienaufbau

Die Datenerhebung der vorliegenden Arbeit erfolgte im Rahmen der Studie „Untersuchung zu physiologischen, testpsychologischen und epigenetischen Parametern bei Soldatinnen und Soldaten der Bundeswehr mit einsatz- und nicht-einsatzbedingten psychischen Belastungen und Erkrankungen“ des PTZ im Bundeswehrkrankenhaus (BwK) Berlin.

Hierbei erfolgte die Untersuchung von Probanden in insgesamt fünf Gruppen:

- Gruppe As: einsatzbedingt PTBS-Erkrankte in stationärer Behandlung
- Gruppe Aw: einsatzbedingt PTBS-Erkrankte ohne Behandlung (Warteliste)
- Gruppe B: Soldaten mit Einsatzerfahrung ohne Erkrankung
- Gruppe C: Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung
- Gruppe D: Soldaten mit moderater chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung

Die Studie gliederte sich in einen Querschnitts- sowie einen Längsschnittteil. Für den Querschnittsteil wurden alle Probanden zu einem ersten Messzeitpunkt untersucht. Für den Längsschnittteil erfolgte die Messung von Teilen der Gruppen As und Aw zu zwei Messzeitpunkten vor und nach einem stationären Therapiesetting bzw. einem adäquaten Zeitintervall ohne Therapie. Die Probanden der Gruppe As erhielten im Rahmen des stationären Therapiesettings eine multimodale vier- bis achtwöchige Traumatherapie. Diese beinhaltete zwei- bis dreimal wöchentliche Einzelgespräche unter Anwendung des traumakonfrontativen *Eye Movement Desensitization and Reprocessing*-Verfahrens (EMDR) durch ausgebildete Traumatherapeuten, eine tägliche ressourcenorientierte Gruppentherapie für traumatisierte Soldaten, traumabezogene Ergotherapie, Entspannungs-, Bewegungs-, Aroma- und Akupunkturtherapie. Einzelne physiologische und psychometrische Parameter wurden zu einem dritten Messzeitpunkt im Sinne der Katamnese erneut gemessen.

Als hypothetische biophysiologische Stressmarker wurden dabei, neben den in dieser Arbeit betrachteten Parametern der Herzfrequenzvariabilität, auch Haarcortisol, *Brain-derived Neurotrophic Factor* (BDNF), BDNF-Genotyp, Omega-3-Fettsäure-Index, Interleukine, Oxytocin, Tumornekrosefaktor- $\alpha$  (TNF- $\alpha$ ) und bestimmte Epigenetikparameter untersucht. Die

Objektivierung der Symptomlast von an einer PTBS erkrankten Soldaten erfolgte mittels *Global Severity Index* (GSI) des *Brief Symptom Inventory* (BSI) und *Posttraumatic Stress Diagnostic Scale* (PDS). Weiterhin wurden potentielle Persönlichkeitsstörungen mittels Strukturiertes klinisches Interview für DSM-IV (SKID-II), die fünf Hauptdimensionen der Persönlichkeit mittels NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI) und die soziale Unterstützung mittels Basisfragebogen betrachtet. Positive und negative Stressverarbeitungsstrategien wurden mittels Stressverarbeitungsfragebogen-78 (SVF-78) sowie diverse Stressfaktoren mittels Trierer Inventar zum chronischen Stress (TICS) ermittelt.

In der vorliegenden Arbeit wurden im Folgenden, mit bereits beschriebener Zielsetzung, die Parameter der Herzfrequenzvariabilität als biophysiolgischem Marker, die psychometrischen Inventare *Global Severity Index* (GSI) des *Brief Symptom Inventory* (BSI) und *Posttraumatic Stress Diagnostic Scale* (PDS) zur Erfassung der Symptomlast und Angaben des Basisfragebogens zur Stichprobencharakterisierung untersucht.

Im Zuge der ordnungsgemäßen Studienanmeldung wurde ein positives Votum der zuständigen Ethikkommission (Nr. EA1/270/11, Änderungszustimmung am 01.03.2012) eingeholt. Die innerhalb der Studie erhobenen personenbezogenen (z. B. Name, Geburtsdatum, Adresse u. a.) und studienbezogenen Daten (z. B. HRV-Parameter) wurden ausschließlich zum Zweck der Studienverwaltung und -durchführung sowie zum Zweck der Forschung und statistischen Auswertung verwendet. Entsprechende Gesetze des Datenschutzes wurden für alle erhobenen Daten beachtet. Alle personenbezogenen Informationen wurden in nicht-digitaler Form, getrennt von allen anderen Daten, mit besonderer Sorgfalt vom Studienleiter unter Verschluss aufbewahrt. Ergänzend erfolgte eine Pseudonymisierung mittels alphanumerischer Codierung. Diese bestand aus der Studienkennung und einer fortlaufenden Nummer. Die erhobenen Daten wurden ausschließlich zum Zwecke der Auswertung den Mitarbeitern des Projektes zugänglich gemacht. Alle beteiligten Ärzte, Psychologen und wissenschaftlichen Mitarbeiter unterlagen dabei der Schweigepflicht. Nach Abschluss von Analyse und Auswertung wurden die Daten in anonymisierter Form gemäß der Satzung zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis für zehn Jahre archiviert und werden anschließend vernichtet werden. Die Probanden können jederzeit die Löschung ihrer Daten verlangen. Vor Aufnahme der Probanden in die Studie wurden diese in mündlicher sowie schriftlicher Form über diese Umstände aufgeklärt und mussten rechtswirksam eine schriftliche Einverständnis- und Datenschutzerklärung unterzeichnen.

### **2.1.1 Rekrutierung und Stichprobe**

Rekrutiert wurde im Zeitraum der Jahre 2012 bis 2014 u. a. über die fachärztliche Untersuchungsstelle und die Station der Klinik VI für Psychiatrie und Psychotherapie des BwK

Berlin, sowie über die arbeitsmedizinische Ambulanz des ehemaligen Instituts für den Medizinischen Arbeits- und Umweltschutz der Bundeswehr des BwK Berlin, Stab und Rettungszentrum des BwK Berlin sowie weitere kooperierende Einheiten der Bundeswehr. Hierfür erfolgten diverse analoge sowie digitale Informationsbereitstellungen. So konnten im Schwerpunkt beispielsweise Probanden aus der Gruppe ohne Einsatzerfahrung mit zu erwartender moderater chronischer Stressbelastung aus der Stabsdienstabteilung des BwK Berlin, jene aus der Gruppe ohne Einsatzerfahrung mit höherer chronischer Stressbelastung aus dem Rettungsdienst des BwK Berlin rekrutiert werden. Die Rekrutierung von durch auslandseinsatzbedingte Belastungen an einer PTBS erkrankten Soldaten erfolgte im Schwerpunkt durch die fachärztliche Untersuchungsstelle und die Station der Klinik VI für Psychiatrie und Psychotherapie des BwK Berlin. Als potentielle Probanden des Längsschnittteils der Studie wurden psychiatrisch-psychotherapeutisch therapienaive Erstvorstellungen herangezogen. Sämtlichen potentiellen Probanden, insbesondere auch jenen aus dem klinischen Vorstellungskontext, wurde die Freiwilligkeit einer Teilnahme aufgezeigt. Die mündliche sowie schriftliche Aufklärung der interessierten Studienteilnehmer erfolgte in einem separaten Erstgespräch, bei welchem auch die Ein- und Ausschlusskriterien sorgfältig abgeprüft wurden. Jedem potentiellen Probanden blieb so die Möglichkeit, die persönliche Einwilligung erst nach sorgfältiger Überlegung mit einer Bedenkzeit von mindestens 24 Stunden zu geben und zuvor offene Fragen zu klären.

Es wurden nur Probanden aus der Berufsgruppe der Berufssoldaten und Soldaten auf Zeit eingeschlossen. Als Ausschlusskriterien wurden in allen Gruppen floride psychische Erkrankungen (mit Ausnahme der untersuchten PTBS) sowie, orientierend an bereits bekannten Einflüssen auf die HRV [66, 68], verschiedene akute somatische Erkrankungen definiert (siehe Tabelle 2.1). So können chronische Erkrankungen wie ein Diabetes mellitus, Multiple Sklerose, Schilddrüsenfunktionsstörungen (bei nicht-normwertigen fT3 und fT4-Werten), ein arterieller Hypertonus sowie eine Medikamenteneinnahme (insbes. Antihypertensiva) die HRV beeinflussen [66]. Weiterhin kann auch die Einnahme von Antidepressiva einen Einfluss auf die HRV zeigen [35, 39, 90]. Dennoch wurde im Rahmen der Gesamtstudie die Einnahme von Antidepressiva nicht als Ausschlusskriterium definiert, da insbesondere Tri- sowie Tetrazyklika nur in geringen Dosen (<20 % der antidepressiv wirksamen Dosis) als Einschlafhilfe verabreicht wurden. Probanden der Studie waren, insbesondere zum Messzeitpunkt nach Therapiebeginn, überwiegend mit tri- und tetrazyklischen Antidepressiva (15 Probanden), aber auch mit Serotonin-Wiederaufnahmehemmern (engl. SSRI) (3 Probanden) und Serotonin-Noradrenalin-Wiederaufnahmehemmern (engl. SNRI) (2 Probanden) mediziert.

Tabelle 2.1: **Ein- und Ausschlusskriterien von Probanden**

---

<b>Allgemeine Einschlusskriterien</b>
Zugehörigkeit zu einer der definierten Probandengruppen
Status: Berufssoldaten, Soldaten auf Zeit
Vorlage unterschriebener Einverständnis- und Datenschutzerklärungen
<b>Allgemeine Ausschlusskriterien</b>
Akute somatische Erkrankungen in allen Gruppen
Floride psychische Erkrankungen mit Ausnahme der untersuchten PTBS
<b>Spezielle Ausschlusskriterien</b>
Chronischer Alkoholabusus
Herzinsuffizienz
Arterieller Hypertonus
Koronare Herzkrankheit, Angina pectoris, Herzinfarkt
Metabolisches Syndrom, Diabetes
Neuropathie
Direkt vorangegangener Nikotinkonsum
Medikation:
<ul style="list-style-type: none"><li>• Antiarrhythmika (potentiell falsch pathologische HRV-Werte)</li><li>• Clonidin (potentiell falsch pathologische HRV-Werte)</li><li>• <math>\beta</math>-Blocker (potentiell falsch normale HRV-Werte)</li><li>• ACE-Hemmer (potentiell falsch normale HRV-Werte)</li><li>• Digitalis (potentiell falsch normale HRV-Werte)</li></ul>
>5 % visuell korrigierte Artefakte

---

## 2.1.2 Querschnittsteil

Insgesamt konnten 135 männliche Probanden rekrutiert werden, für welche die Messung der beschriebenen Parameter zu einem ersten Messzeitpunkt erfolgte. Während der Studie brach ein Proband die Teilnahme ab (Dropout), weitere sechs erfüllten einzelne spezielle Ausschlusskriterien, acht konnten keiner Gruppe zugeordnet werden. Da für diese Auswertung ausschließlich jene Probanden herangezogen wurden, bei denen sowohl die NN-Intervalle, das Alter als auch die Anzahl der bisherigen Einsatztage bekannt waren, verblieben 118 Probanden für die weitere Auswertung (siehe Abbildung 2.1).

Avisiert wurde parameterunspezifisch ein Stichprobenumfang von insgesamt 150 Probanden ( $n=30$  für die jeweiligen Gruppen As, Aw, B, C und D). Bei einer Signifikanzprüfung (mit  $\alpha=0,05$  für jede der untersuchten Messgrößen separat) auf den jeweiligen Effekt ließen sich damit mittlere Effekte (Cohen's  $f\approx 0,3$ ) mit 80%-iger Power erkennen.

Die Einteilung der Probanden erfolgte nach Diagnose und chronischer Stressbelastung in vier Gruppen, wobei die Unterteilung von Gruppe A in die zwei Untergruppen As und Aw nur in der Auswertung des Längsschnittteils der Studie zum Tragen kam. Die für einzelne Probandengruppen notwendige Diagnose einer einsatzbedingten PTBS wurde durch Fachärzte für Psychiatrie und Psychotherapie gestellt und durch die Studienleiter anhand der Probandenakten validiert. Die Gruppen C und D wurden gemeinsam rekrutiert und befragt. Anschließend erfolgte die Einteilung in die beiden Gruppen auf Grundlage des TICS. Das TICS ist ein standardisierter Fragebogen mit 57 Items zur differenzierten Diagnostik verschiedener Facetten von chronischem Stress. Die internen Konsistenzen der Skalen liegen zwischen Cronbachs  $\alpha=0,84$  und  $\alpha=0,91$  [91]. Nicht bei allen Probanden war eine Gruppeneinteilung möglich. Als demografische Größen wurden das Alter und Anzahl der bisherigen Einsatztage erfasst. In die Analyse einbezogene Probanden:

- Gruppe A:  $n = 35$  Soldaten mit einsatzbedingter PTBS
- Gruppe B:  $n = 30$  Soldaten mit Einsatzerfahrung ohne Erkrankung im klinischen Interview
- Gruppe C:  $n = 22$  Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung
- Gruppe D:  $n = 31$  Soldaten mit moderater chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung

### 2.1.3 Längsschnittteil

Für den Längsschnittteil der Studie erfolgten bei 34 Probanden Messungen an bis zu zwei weiteren Messzeitpunkten: Vor und unmittelbar nach einer stationären Psychotherapie (Gruppe As) sowie ohne Therapie (Warteliste) vor und nach einem vergleichbaren Zeitraum (im Mittel zwei Monate, Gruppe Aw). Da auch für diese Auswertung ausschließlich jene Probanden herangezogen wurden, bei denen sowohl die NN-Intervalle, das Alter als auch die Anzahl der bisherigen Einsatztage bekannt waren, verblieben 32 Probanden für die weitere Auswertung (siehe Abbildung 2.1).

Avisiert wurde parameterunspezifisch ein Stichprobenumfang von insgesamt 60 Probanden ( $n=30$  für die jeweiligen Gruppen As und Aw). Für den Differenzvergleich der Messgrößen zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt jeder Messgröße ließen sich damit mittlere Effekte (Cohen's  $f \approx 0,35$ ), bei einer Gruppengröße von  $\approx 15$  Probanden allerdings schon große (Cohen's  $f \approx 0,5$ ) erkennen.

Die Probanden der Gruppe A wurden vor und unmittelbar nach einer stationären Psychotherapie sowie ohne Therapie vor und nach einem vergleichbaren Zeitraum untersucht und entsprechend den folgenden Untergruppen in die Analyse einbezogen:

- Gruppe As:  $n = 15$  Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Behandlung
- Gruppe Aw:  $n = 17$  Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne Behandlung (Warteliste)

Weiterhin wurden 15 Probanden der Gruppe As auch noch zu einem dritten Messzeitpunkt (ca. drei Monate nach dem zweiten Messzeitpunkt) untersucht.

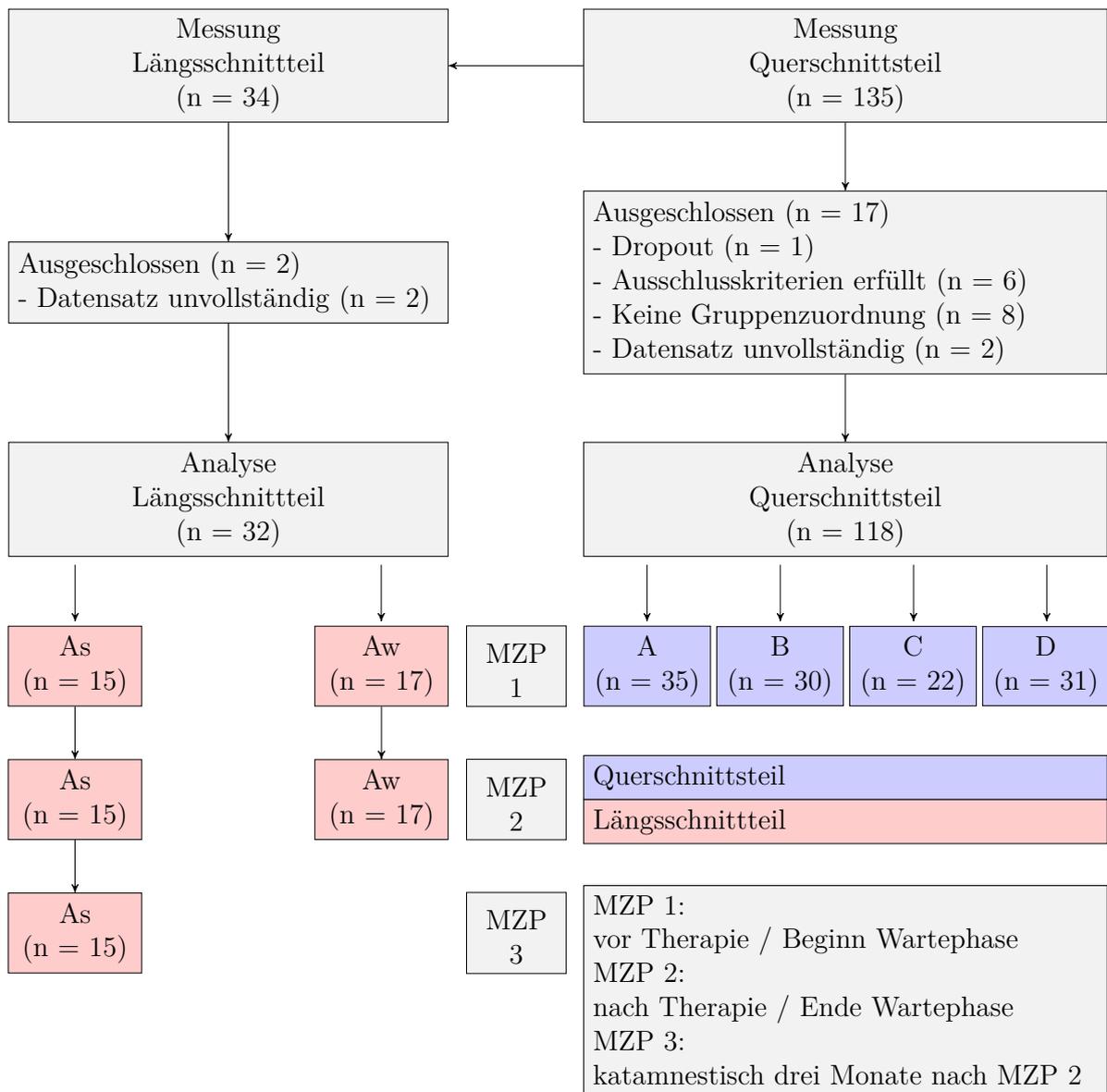


Abbildung 2.1: Studiendesign und Probandenzahlen Messzeitpunkte werden mit *MZP* bezeichnet.

## 2.2 Erhobene Parameter und Zielgrößen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für alle eingeschlossenen Probanden einmalig am ersten Messzeitpunkt die HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio untersucht. Weiterhin wurden mittels Basisfragebogen demografische Merkmale (Alter, Anzahl und Dauer der Einsätze, Tätigkeit), Daten zur Gesundheit und zur Ernährung erhoben. Das Vorliegen etwaiger psychiatrischer Erkrankungen wurde mittels Diagnostisches Kurzinterview bei psychischen Störungen (Mini-DIPS) evaluiert. Zur Quantifizierung der psychischen Symptomlast wurden die Fragebogenscores BSI-GSI und PDS-gesamt, erhoben mittels Selbstauskunftsfragebögen BSI und PDS, beides probate und validierte Mittel zur Erfassung der Symptomlast [92–97], herangezogen. Für einen Teil der Probanden erfolgte die Untersuchung und Datenerhebung an zwei Messzeitpunkten jeweils vor und nach erfolgter stationärer Traumatherapie (Gruppe As) bzw. einem adäquaten Zeitintervall ohne stattgehabte Therapie (Gruppe Aw) sowie für einen Teil der Gruppe As auch katamnestisch zu einem dritten Messzeitpunkt. Die Erhebung wurde maßgeblich von den Mitarbeitern des PTZ unterstützt.

### 2.2.1 *Brief Symptom Inventory (BSI)*

Das BSI bildet in verkürzter Form die *Symptom-Checklist-90®-Standard* (SCL-90-R) ab [92]. Es umfasst insgesamt 53 Items. Bei der SCL-90-R sind es insgesamt 90. Anhand einer fünfstufigen Skala sind diese Items durch den Patienten selbst zu bewerten. Gefragt wird dabei nach Symptomen der vergangenen sieben Tage. Somit ist das BSI gut geeignet, um die aktuelle Symptomlast abzubilden. Die abgefragten Symptome sind beim BSI in neun Symptomdimensionen gegliedert. Hieraus werden drei spezielle Messwerte berechnet. Einer davon ist der GSI [96], welcher auch in dieser Arbeit statistische Betrachtung erfährt. Das BSI stellt hierdurch ein Instrument zur Erfassung subjektiver Beeinträchtigung durch körperliche und psychische Symptome dar.

Die Testgütekriterien zeigen eine befriedigende bis hohe interne Konsistenz zwischen Cronbachs  $\alpha=0,63$  und  $\alpha=0,93$ ) [98].

### 2.2.2 *Posttraumatic Stress Diagnostic Scale (PDS)*

Die PDS wurde 1996 aus dem Englischen in die deutsche Sprache übersetzt [99]. Als Selbstauskunftsinstrument soll die PDS Personen mit einer PTBS schnell und effizient erkennen und deren Symptome quantifizieren [94, 95]. Es werden traumatische Erlebnisse und Symptome der PTBS abgefragt. Hierbei wird sich an den Diagnosekriterien des DSM-IV

orientiert [100]. Verwendet wird die PDS in dieser Arbeit ohne Anwendung eines Cutoff-Wertes, um die Schwere der PTBS-Symptomatik wiedergeben zu können. Nachteil des PDS sind die bisher fehlenden Untersuchungen zu den Gütekriterien der deutschen Übersetzung.

Die interne Konsistenz des Instruments lag beim Vorläufer bei Cronbachs  $\alpha=0,92$  wobei auch die einzelnen Subskalen „Wiedererleben“ (Cronbachs  $\alpha=0,78$ ), „Vermeidung“ (Cronbachs  $\alpha=0,84$ ) und „*Arousal*“ (Cronbachs  $\alpha=0,84$ ) eine hohe interne Konsistenz zeigten. Die internen Konsistenzen für die aktuelle übersetzte Version liegen zwischen Cronbachs  $\alpha=0,78$  und Cronbachs  $\alpha=0,98$  [101].

### **2.2.3 Diagnostisches Kurzinterview bei psychischen Störungen und Strukturiertes Klinisches Interview für DSM-IV**

Das Diagnostische Kurzinterview bei psychischen Störungen (Mini-DIPS) dient als verkürzter Interviewleitfaden des ursprünglichen Fragebogens Diagnostisches Interview bei psychischen Störungen (DIPS) der standardisierten und strukturierten Erfassung sowie Diagnostik aktueller psychischer Syndrome und Störungen gemäß DSM-IV Achse I. Die Inter-Rater-Reliabilität liegt bei 95 %. Das Strukturierte Klinische Interview für DSM IV (SKID-II) stellt ein multiaxiales System dar. Es erfasst und beschreibt psychiatrische Diagnosen in fünf Achsen. So werden persönlichkeitsstrukturelle Problematiken der Achse II des DSM-IV abgebildet. Außerdem werden Codierungsmöglichkeiten für die Beurteilung von Achse III (medizinische Krankheitsfaktoren) und Achse IV (psychosoziale und umgebungsbedingte Probleme) abgedeckt.

Es ist eine befriedigende Test-Retest-Reliabilität ( $r=0,70$ ) und eine moderate Inter-Rater-Reliabilität ( $r=0,78$ ) bekannt [102]. Beide Instrumente wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Erfassung des Diagnosespektrums eingesetzt.

### **2.2.4 Parameter der Herzfrequenzvariabilität**

Als Parameter der HRV wurden SDNN, RMSSD und die LF/HF-Ratio erhoben (siehe Tabelle 2.2). SDNN (ms) ist definiert als die Standardabweichung aller NN-Intervalle im EKG einer Messung und stellt einen zeitbezogenen HRV-Parameter dar. SDNN gilt als Indikator der Höhe der Gesamtvariabilität und kann keinem Anteil des vegetativen Nervensystems klar zugeordnet werden. Ein hoher SDNN-Wert bedeutet eine hohe HRV, ein niedriger eine niedrige HRV. RMSSD (ms) ist als die Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen sukzessiver NN-Intervalle definiert und stellt ebenfalls einen zeitbezogenen HRV-Parameter dar. Als Indikator der Kurzzeitvariabilität repräsentiert RMSSD

die parasympathische Aktivität des vegetativen Nervensystems. Die LF/HF-Ratio ist als Quotient der sympathovagalen Balance definiert und stellt einen frequenzbezogenen HRV-Parameter dar. Die LF/HF-Ratio gilt als ein Maß des vegetativen Gleichgewichts, wobei das Hochfrequenzband (HF) eher der parasympathischen Aktivität, das Niedrigfrequenzband (LF) der sympathischen Aktivität zugeordnet wird. So werden steigende Werte der LF/HF-Ratio bei steigender Sympathikusaktivität angenommen. [27, 35]

Tabelle 2.2: **Untersuchte HRV-Parameter** [27]

<b>Untersuchte HRV-Parameter</b>	
SDNN	<i>Standard deviation of NN intervals</i> : Indikator der Gesamtvariabilität, keine klare Zuordnung zu Sympathikus/Parasympathikus
RMSSD	<i>Root Mean Square of successive differences</i> : Indikator der Kurzzeitvariabilität, Zuordnung zum Parasympathikus
LF/HF-Ratio	Quotient der sympathovagalen Balance; gilt als Wert des Zusammenspiels von Parasympathikus (HF) und Sympathikus (LF), je höher der Quotient, desto höher ist die sympathische Aktivität

Die HRV-Analyse erfolgte vor den anderen Untersuchungen der Gesamtstudie. Hierdurch wurde gewährleistet, dass die Probanden zum Untersuchungszeitpunkt einen maximal entspannten Zustand hatten. Die Probanden wurden unter standardisierten Bedingungen (Tagesszeit und entspannt sitzende Körperposition) einer fünfminütigen EKG-Ableitung unterzogen. Zuvor fand eine manuelle Messung des Blutdrucks statt, welcher in die Auswertung miteinbezogen wurde. Die Ausgabe der HRV-Parameter erfolgte automatisiert durch die geräteeigenen Algorithmen, nachdem eine Sichtung und Korrektur von fehlerhaft erkannten NN-Intervallen sowie ein Ausschluss von Herzrhythmusstörungen stattgefunden hatte. Zur Information wurden Angaben zu Körpergewicht, Vordiagnosen, sportlicher Aktivität und in einem zweistündigen Intervall vor Messung eingenommenen Stimulantien vermerkt.

### 2.2.5 Gerät zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Die Analyse der HRV-Parameter erfolgte mit dem medizinischen Gerät *prenoscan*® (siehe Tabelle 2.3), entwickelt zur Messung, Analyse und Darstellung von 6 Standard-EKG-Ableitungen (I, II, III, aVR, aVL, aVF) sowie der Analyse der HRV und ihrer grundlegenden

Variabilitätsparameter (siehe Tabelle 2.4). Entwickelt und hergestellt wurde das Gerät von der *automation & software Günther Tausch GmbH*. Klassifiziert wird es als Klasse IIa-Gerät entsprechend der Richtlinie 93/42/EEC für medizinische Geräte. Es umfasst ein PC-Modul sowie die Software, welche auf Grundlage der aufgezeichneten EKG-Ableitungen die eigentliche Analyse der HRV vollzieht. [103]

Tabelle 2.3: **Lieferumfang *prenoscan*<sup>®</sup>** [103]

---

<b>Lieferumfang</b>
<i>prenoscan</i> <sup>®</sup>
4 Elektrodenklemmen in den Farben rot, grün, gelb und schwarz
2 Touchscreen-Stifte
<i>prenoscan</i> <sup>®</sup> -Stromversorgungskabel
Drucker
Drucker-Stromversorgungskabel inkl. Netzteil
USB-Kabel
<i>prenoscan</i> <sup>®</sup> -Handbuch
Transportkoffer

---

## 2.2.6 Arbeitsschritte zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität

Der Ablauf aller Arbeitsschritte bis zur HRV-Analyse wurde vor Durchführung der ersten Messungen durch eine Standardarbeitsanweisung festgelegt. Dieses Vorgehen diente der Maßgabe Messungen unter möglichst gleichen Rahmenbedingungen erfolgen zu lassen und Anwenderfehler bei den Untersuchungen zu minimieren. Im Folgenden werden Grundfunktionen (siehe Tabelle 2.4) sowie in verkürzter Form der Untersuchungsablauf dargestellt:

Tabelle 2.4: Grundfunktionen *prenoscan*® [103]

---

Grundfunktionen
5-minütige EKG-Erfassung der Ableitungen I, II, III, aVR, aVL, aVF; Analyse und Visualisierung
Herzfrequenzvariabilitätsanalyse und Indizierung der regulativen Systemaktivität mittels Farbindex für das Stresslevel
Analyse und Visualisierung der zu Grunde liegenden Herzfrequenzvariabilitätsparameter
Erstellung von Schlussfolgerungen und Anmerkungen

---

**Inbetriebnahme des *prenoscan*®** Mithilfe des vorgesehenen Standfußes wurde das Gerät auf festem Untergrund aufgestellt, durch dessen Öffnung die Kabel gelegt. Die Kabel wurden an die gleichfarbigen Elektrodenklemmen angeschlossen. Die Sicherstellung der Stromversorgung erfolgte über das beiliegende Netzkabel. Das Gerät wurde unter Eingabe des spezifischen Gerätepasswortes eingeschaltet.

**Vorbereitung der Untersuchung** Die Navigation in den Probandenordner erfolgte mittels Touchscreen, auf welchem im oberen linken Bereich die Ordnerstruktur, im oberen rechten Bereich die Patientenauflistung und im unteren Bereich die entsprechenden Untersuchungen aufgelistet waren. Falls ein entsprechender Proband noch nicht vorhanden war, wurde dieser neu angelegt. Hierzu wurde in den Probandenordner im linken oberen Bereich des Touchscreens navigiert, in diesem auf die Schaltfläche geklickt, welche als leere Seite dargestellt war, um einen neuen Probanden anzulegen, der Name, nebst den Angaben Geschlecht, Geburtsdatum, Größe, Gewicht, angegeben. Festgelegt war für diese Studie die einheitliche Eingabe der Probandennummer: Lautete diese beispielsweise *PTEK-999-1* wurde als Nachname des Probanden *PTEK-999*, als Vorname *1* eingegeben. Die Angaben Ordnungsnummer, Diagnose und Bemerkung waren nicht verpflichtend, die Angaben Diagnose, Art der Tätigkeit und Sport waren rein informativ und gingen nicht in die Auswertung ein. Die Angabe Diagnose konnte entweder als einzelne Information ausgewählt werden oder aber über die Schaltfläche *med. Beh.* mit einer Kennzeichnung versehen werden, sodass ersichtlich war, dass sich der Proband bereits in Behandlung bezüglich der entsprechenden Erkrankung befand. Nach Tätigung der Angaben wurde auf die Schaltfläche *Anlegen* geklickt. Sofern

dieser schon vorhanden war, wurde der entsprechende Proband in der Probandenverwaltung ausgewählt.

**Vorbereitung des Probanden** Die Ermittlung des Blutdruckes des Probanden erfolgte mittels manueller Blutdruckmessung nach Riva-Rocci. Nach Verbesserung der Ableitfähigkeit der metallenen Ableitelektroden durch die Anwendung von Elektrodenkontaktspray wurden die Elektroden am entspannt sitzenden Probanden als bipolare Extremitätenableitungen nach Einthoven gemäß folgendem Schema angelegt:

- Gelb - linker Arm
- Rot - rechter Arm
- Grün - linkes Bein
- Schwarz - rechtes Bein

**Einleitung der Untersuchung** Um eine neue Untersuchung einzuleiten wurde zunächst der gewünschte Proband ausgewählt und nachfolgend auf die Schaltfläche *Neue Untersuchung* geklickt. Im sich öffnenden Fenster konnten im Abschnitt Patientendaten nochmals die Daten Körpergewicht, Diagnose, Art der Tätigkeit und Sport eingesehen und geändert werden. Im Abschnitt Untersuchungsdaten wurden Angaben zu Stimulantien (z. B. Kaffee, Nikotin, Alkohol u. a.) gemacht, die vom Patienten in den letzten zwei Stunden konsumiert worden waren. Hierzu wurde auf die Schaltfläche rechts neben dem Feld geklickt und es öffnete sich ein weiteres Fenster, in welchem die entsprechenden Stimulantien ausgewählt und mit der Schaltfläche *OK* bestätigt wurden. Weiterhin wurden in diesem Abschnitt die Angaben Untersuchungsort und Blutdruck getätigt. Wichtig von diesen Angaben war der Blutdruck, der in die Analyse miteinbezogen wurde. Die anderen Angaben waren erneut rein informativ. Bei Bemerkungen konnten weitere Angaben zur Untersuchung gemacht werden. Wurden alle Angaben getätigt und ggfs. korrigiert, gelangte man durch Klicken auf die Schaltfläche *Weiter* in das nächste Fenster.

**Start der Untersuchung** Nachdem der korrekte Sitz der Elektroden nochmals überprüft und mit einem Klick auf die Schaltfläche *Messung starten* die EKG-Ableitung begonnen worden war, erfolgte die EKG-Ableitung über einen Zeitraum von fünf Minuten. Während dieser Zeit sollte sich der Proband nicht merklich bewegen und nicht sprechen. Ebenso wurde ein störungsfreies Umfeld für den Zeitraum der Messung geschaffen. Die gesamte Ableitung erfolgte in entspannt sitzender Position des Probanden. Nach Ablauf des genannten Zeitintervalls erschien auf dem Touchscreen eine Benachrichtigung. Bestätigte man diese mit der Schaltfläche *OK* wurde das erstellte EKG geöffnet.

**Abschluss der Untersuchung und weiteres Vorgehen** Das erstellte EKG konnte bedarfsweise eingesehen, kontrolliert, bearbeitet und ausgewertet werden. Die EKG-Kontrolle, -Bearbeitung sowie insbesondere -Korrektur und somit die Gesamtauswertung wurde durch zuvor eingewiesenes ärztliches Personal durchgeführt. Hierbei kamen auch Ausschlusskriterien zur Anwendung. Messungen mit manifesten HRST sowie jene mit  $> 5\%$  visuell korrigierter Artefakte wurden von der Auswertung ausgenommen. Nach Auswertung der Messung erfolgte die Ausgabe bei angeschlossenem Drucker als tabellarische Übersichtsseite der Einzelwerte. Diese erreichte man durch Betätigen der Schaltflächen *Ansicht* und *Einzelwerte* auf der nach der Auswertung geöffneten Ergebnisübersichtsseite. Diese Seite wurde mit Datum und Unterschrift der Person versehen, durch welche zuvor Kontrolle, Bearbeitung, Korrektur und Auswertung stattgefunden haben und verblieb bis zur endgültigen Interpretation im Studienordner.

## 2.3 Statistische Auswertung

### 2.3.1 Querschnittsteil

Für die Auswertung im Querschnittsteil erfolgte eine gemeinsame Betrachtung der Gruppen As (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Behandlung) und Aw (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne Therapie (Warteliste)) als Gruppe A (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS), um eine vergleichende Betrachtung von an einer einsatzbedingten PTBS erkrankten und gesunden einsatzerfahrenen Soldaten zu ermöglichen. Eine weitere vergleichende Betrachtung erfolgte zwischen den Gruppen C (Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung) und D (Soldaten mit moderater chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung), um eine potentielle Differenzierung zwischen stärker und weniger stark belasteten Soldaten im Inland ohne Einsatzerfahrung durch die HRV beurteilen zu können.

### **Gibt es bezüglich der HRV Unterschiede zwischen Soldaten mit unterschiedlichen Belastungen, zum einen zwischen Gruppen A und B, zum anderen zwischen Gruppen C und D?**

Für die erste Fragestellung erfolgte die Auswertung mittels Kovarianzanalyse (engl. ANCOVA). Hierbei wurden als abhängige Variablen die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio jeweils separat), als unabhängige Variablen die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), das Alter sowie die bisherigen Einsatztage der Probanden analysiert. Es

handelte sich demnach um sechs einzelne Tests. Die Residuen der HRV-Parameter zeigten eine Normalverteilung im Kolmogorov-Smirnov-Test (Ausnahme: Residuen von LF/HF-Ratio bei Untersuchung der Gruppen A/B), sodass dort die ANCOVA als parametrischer Test anwendbar war. Der Vollständigkeit halber wurde die ANCOVA auch beim Vergleich von LF/HF-Ratio zwischen den Gruppen A und B angewandt.

### **Kann man mit der HRV die Gruppenzugehörigkeit vorhersagen?**

Für die zweite Fragestellung erfolgte die Auswertung mittels Logistischer Regression mit der abhängigen Variable der Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat) und den HRV-Parametern (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio jeweils separat), dem Alter sowie den bisherigen Einsatztagen der Probanden als unabhängigen Variablen.

### **Welche der HRV-Parameter korrelieren mit der Symptomlast, ebenfalls bei getrennter Betrachtung der Gruppen A/B sowie C/D?**

Für die dritte Fragestellung erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Hierbei waren die Symptomlast BSI-GSI, PDS-gesamt jeweils separat die abhängige Variable, die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio jeweils separat), das Alter sowie die bisherigen Einsatztage der Probanden die Einflussgrößen. Getrennt untersucht wurden die Gruppen A/B und Gruppen C/D. Es handelte sich demnach um zwölf einzelne Tests. Bei neun dieser Tests waren die Residuen laut Kolmogorov-Smirnov-Test normalverteilt, bei drei Tests waren sie es nicht. Allerdings war die Abweichung von der Normalverteilung bei diesen drei Tests nicht groß. Insgesamt war somit die Anwendung der Korrelationsanalyse als parametrischem Test vertretbar.

## **2.3.2 Längsschnittteil**

Im Gegensatz zum Querschnittteil erfolgte im Längsschnittteil zusätzlich eine gesonderte Betrachtung der Gruppen As (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Behandlung) und Aw (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne Therapie (Warteliste)), um auch die Eignung erhobener HRV-Parameter zur Einschätzung des Therapieverlaufs beurteilen zu können und dabei den Gruppenunterschied eines reinen Warteintervalls sowie einer stattgehabten psychotherapeutischen Behandlung zu berücksichtigen.

**Korrelieren in Gruppe A die HRV-Parameter oder deren Änderung (zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt) mit der Änderung in der Symptomlast? Gibt es dabei Unterschiede zwischen Untergruppen As und Aw?**

Die Auswertung erfolgte mittels Regressionsanalyse. Hierbei waren die Änderung der Symptomlast  $\Delta$ BSI-GSI,  $\Delta$ PDS-gesamt (jeweils separat) zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt die abhängigen Variablen. Die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio am ersten Messzeitpunkt, jeweils separat) bzw. die Änderung der HRV-Parameter ( $\Delta$ SDNN,  $\Delta$ RMSSD,  $\Delta$ LF/HF-Ratio zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt), Alter, bisherige Einsatztage stellten die Einflussgrößen dar. Die Hauptauswertung erfolgte in der Gesamtgruppe A, die Nebenauswertungen in den Untergruppen As und Aw separat. Die Hauptauswertung bestand demnach aus zwölf einzelnen Tests. Der Kolmogorov-Smirnov-Test lehnte bei keinem dieser Tests die Normalverteilung der Residuen ab, sodass die Regressionsanalyse als parametrischer Test anwendbar war. Die zum dritten Messzeitpunkt erhobenen Daten wurden rein deskriptiv dargestellt.

# 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden demographische Daten des Untersuchungskollektivs (Alter und Anzahl der Einsatztage) sowie Daten zur Belastung der einzelnen Gruppen dargestellt. Nachfolgend werden die erhobenen HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio) sowie die Belastungsgrößen BSI-GSI und PDS im Rahmen der statistischen Auswertungen der spezifischen Fragestellungen im Quer- und Längsschnittteil genauer betrachtet. Die statistischen Berechnungen wurden im Auftrag des PTZ durch PD Dr. rer. nat. Girgensohn mittels *IBM SPSS Statistics 22* durchgeführt.

## 3.1 Darstellung des Untersuchungskollektivs

### 3.1.1 Alter und Einsatztage der Probanden

Bei der Rekrutierung der Probanden wurde bereits durch die Auswahl rein männlicher Probanden darauf abgezielt, eine möglichst homogene Gruppe zu generieren. Mittels Ausschlusskriterien wurden diverse bekannte Beeinflussungsfaktoren wie verschiedene somatische und psychische Erkrankungen sowie Medikationen eliminiert. Dennoch bestanden im Untersuchungskollektiv divergierende Faktoren wie das Alter oder die Dauer des Aufenthaltes im Auslandseinsatz der einzelnen Probanden fort. Das Alter wurde in ganzen Lebensjahren erhoben, die Einsatzerfahrung durch die Anzahl der Tage bisheriger Auslandseinsätze abgebildet. Auch wenn bei den Einsatztagen die Residuen laut Kolmogorov-Smirnov-Test nicht normalverteilt sind, wurde zwecks Vergleichbarkeit mit vorangegangenen explorativen Auswertungen der t-Test als parametrischer Test angewandt. Bei Anwendung des U-Tests als nicht-parametrischem Test ergibt sich für die Einsatztage ebenfalls keine zusätzliche Signifikanz.

Es zeigt sich, dargestellt in Tabelle 3.1, dass Probandengruppe B das höchste Durchschnittsalter ( $32,7 \pm 5,56$  Jahre) hat. Gefolgt wird diese von den Gruppen C ( $30,5 \pm 8,17$  Jahre) und D ( $30,2 \pm 6,52$  Jahre). Die deutlich jüngste Probandengruppe ( $28,5 \pm 5,69$  Jahre) stellt die Gruppe A dar. Zudem unterscheiden sich im Vergleich die Gruppen A und B bezüglich des Durchschnittsalters signifikant voneinander. Bezüglich der Anzahl der Einsatztage lässt sich festhalten, dass auch hier Gruppe B den höchsten Wert ( $340,3 \pm 242,34$  Tage) erzielt, während die geringste Anzahl an Einsatztagen in Gruppe D ( $144 \pm 211,13$  Tage) vorliegt. Probanden der Gruppen A ( $249,3 \pm 152,13$  Tage) und C ( $248,8 \pm 371,51$  Tage) befanden sich bis zum

Studienbeginn mit annähernd der gleichen Anzahl an Tagen im Auslandseinsatz. Zwischen den Gruppen A und B sowie C und D besteht dabei kein signifikanter Unterschied.

Tabelle 3.1: **Darstellung der Ergebnisse des Basisfragebogens für die Merkmale „Alter“ und „Einsatztage“ für die Probandengruppen** Zur Überprüfung von Unterschieden der Probandengruppen hinsichtlich der Merkmale „Alter“ und „Anzahl der Einsatztage“ erfolgte die Anwendung des t-Testes.

Gruppe	Alter		Einsatztage	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
A	28,5	5,69	249,3	152,13
B	32,7	5,56	340,3	242,34
t-Test	t(63)=3,010, p=0,004		t(63)=1,839, p=0,071	
C	30,5	8,17	248,8	371,51
D	30,2	6,52	144,0	211,13
t-Test	t(51)=0,145, p=0,885		t(51)=1,305, p=0,198	

### 3.1.2 Belastung der Probanden

In einem weiteren Schritt wurden die verschiedenen Gruppen unter dem Gesichtspunkt der potentiell unterschiedlichen Belastung betrachtet. Hierbei erfolgte die Erkennung und Quantifizierung der Symptomlast durch die Selbstauskunftsfragebögen PDS und BSI, welcher die subjektive Symptomlast als GSI-Wert erfasst. Sowohl für den PDS als auch für den GSI des BSI zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen. Die Signifikanzen bleiben erhalten, wenn Alter und Anzahl der Einsatztage als zusätzliche Einflussgrößen berücksichtigt werden. Hier ist zu beachten, dass nicht für alle Probanden die Symptomlast mittels BSI bzw. PDS gemessen wurde, sodass die Fallzahlen etwas kleiner sind als zuvor angegeben. Nur für den Gruppenvergleich der Gruppen C und D sind die Residuen der beiden Belastungsparameter laut Kolmogorov-Smirnov-Test nicht normalverteilt. Es wurde der t-Test als parametrischer Test angewandt, der U-Test als nicht-parametrischer Test lieferte dieselben Signifikanzen.

Wie in Tabelle 3.2 dargestellt, hebt sich insbesondere Gruppe A hinsichtlich des BSI-GSI als auch des PDS von den Gruppen B, C und D ab. Der Mittelwert des GSI liegt in Gruppe A bei  $1,512 \pm 0,8248$ , gefolgt von Gruppe C ( $0,315 \pm 0,3154$ ), Gruppe B ( $0,143 \pm 0,194$ ) und Gruppe D ( $0,091 \pm 0,1475$ ). Hierbei stellen sich sowohl der Unterschied zwischen Gruppe A (Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS) und Gruppe B (Soldaten mit Einsatzerfahrung ohne PTBS) als auch jener zwischen Gruppe C (Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung

ohne Einsatzerfahrung) und Gruppe D (Soldaten mit moderater chronischer Stressbelastung ohne Einsatzerfahrung) als signifikant dar. Der Mittelwert des PDS liegt in Gruppe A bei  $1,906 \pm 0,6239$ , gefolgt von Gruppe C ( $0,336 \pm 0,4984$ ), Gruppe B ( $0,130 \pm 0,1976$ ) und Gruppe D ( $0,067 \pm 0,1132$ ). Statistisch signifikante Unterschiede können auch hier zwischen den Gruppen A und B sowie C und D festgehalten werden.

Tabelle 3.2: **Darstellung der quantifizierten Symptomlast für die Probandengruppen** Zur Überprüfung von Unterschieden der durch BSI-GSI sowie PDS gemessenen Symptomlast im Untersuchungskollektiv erfolgte die Anwendung des t-Testes.

Gruppe	Belastung (BSI-GSI)			Belastung (PDS)		
	Mittelwert	Standardabweichung	n	Mittelwert	Standardabweichung	n
A	1,512	0,8248	35	1,906	0,6239	35
B	0,143	0,1940	30	0,130	0,1976	28
t-Test	t(63)=8,871, <b>p&lt;0,001</b>			t(61)=14,473, <b>p&lt;0,001</b>		
C	0,315	0,3154	21	0,336	0,4984	17
D	0,091	0,1475	30	0,067	0,1132	24
t-Test	t(49)=3,404, <b>p&lt;0,001</b>			t(39)=2,568, <b>p=0,014</b>		

## 3.2 Querschnittsteil

### 3.2.1 Gruppenunterschiede der Herzfrequenzvariabilität

Im Querschnittsteil sollte in einem ersten Schritt die Frage nach der Korrelation der drei HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio mit der Gruppenzugehörigkeit beurteilt werden. Hierzu wurden die zum ersten Messzeitpunkt erhobenen Werte gemittelt. Die Auswertung erfolgte mittels ANCOVA. Die zu betrachtende Signifikanz der Gruppenunterschiede wurde mit dem F-Test überprüft.

Es zeigt sich, dargestellt in den Tabellen 3.3 - 3.5, dass offensichtliche Unterschiede zwischen den Gruppen A und B sowie C und D bestehen. Die Gruppe der Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe A) weist regelhaft niedrigere Werte auf als die Gruppe einsatzerfahrener Soldaten ohne PTBS (Gruppe B), die Gruppe von Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit moderater chronischer Stressbelastung (Gruppe D) höhere Werte als die Gruppe von Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit höherer chronischer Stressbelastung (Gruppe C). Unterschiede im Sinne einer statistischen Signifikanz bestehen bei dieser Betrachtung jedoch ausschließlich für SDNN.

Für SDNN liegen die Mittelwerte von Gruppe A ( $\bar{x}(A)=44,87\pm 19,113$ ) niedriger als die aller anderen Gruppen. Der Unterschied zu den Mittelwerten von Gruppe B ( $\bar{x}(B)=54,41\pm 20,149$ ) stellt sich als signifikant dar ( $p=0,027$ ). Die Mittelwerte von Gruppe D ( $\bar{x}(D)=68,26\pm 28,593$ ) liegen höher als die aller anderen Gruppen. Der Unterschied zu den Mittelwerten von Gruppe C ( $\bar{x}(C)=51,74\pm 25,041$ ) stellt sich hierbei als ebenfalls signifikant dar ( $p=0,035$ ) (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: **Gruppenzugehörigkeit und SDNN (A/B, C/D)** Zur Überprüfung der Gruppenzugehörigkeit und SDNN erfolgte die Auswertung mittels ANCOVA. Die abhängige Variable ist hier der HRV-Parameter SDNN, die unabhängigen Variablen sind die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis ist die vom F-Test angezeigte Signifikanz des Gruppenunterschieds angegeben.

	SDNN	
Gruppe	Mittelwert	Standardabweichung
A	44,87	19,113
B	54,41	20,149
F-Test	F(1,61)=5,105, $p=0,027$	
C	51,74	25,041
D	68,26	28,593
F-Test	F(1,49)=4,702, $p=0,035$	

Tabelle 3.4: **Gruppenzugehörigkeit und RMSSD (A/B, C/D)** Zur Überprüfung der Gruppenzugehörigkeit und RMSSD erfolgte die Auswertung mittels ANCOVA. Die abhängige Variable ist hier der HRV-Parameter RMSSD, die unabhängigen Variablen sind die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis ist die vom F-Test angezeigte Signifikanz des Gruppenunterschieds angegeben.

	RMSSD	
Gruppe	Mittelwert	Standardabweichung
A	30,59	16,772
B	34,05	17,880
F-Test	F(1,61)=1,670, $p=0,201$	
C	40,05	27,137
D	50,42	38,166
F-Test	F(1,49)=1,135, $p=0,292$	

Auch für RMSSD liegen die Mittelwerte von Gruppe A ( $\bar{x}(A)=30,59\pm 16,772$ ) niedriger als die aller anderen Gruppen. Allerdings stellt sich der Unterschied zu den Mittelwerten von Gruppe B ( $\bar{x}(B)=34,05\pm 17,880$ ) als nicht signifikant dar ( $p=0,201$ ). Ebenso liegen die Mittelwerte von Gruppe D ( $\bar{x}(D)=50,42\pm 38,166$ ) wie schon beim HRV-Parameter SDNN höher als die aller anderen Gruppen. Jedoch stellt sich auch hier der Unterschied zu den Mittelwerten von Gruppe C ( $\bar{x}(C)=40,05\pm 21,137$ ) als nicht signifikant dar ( $p=0,292$ ) (siehe Tabelle 3.4).

Ein in Einzelaspekten abweichendes Ergebnis zeigt sich für die Betrachtung des HRV-Parameters LF/HF-Ratio. Hier liegen die Mittelwerte von Gruppe A ( $\bar{x}(A)=3,51\pm 3,621$ ) zwar ebenfalls niedriger als die Mittelwerte von Gruppe B ( $\bar{x}(B)=4,44\pm 4,301$ ), jedoch nicht niedriger als die aller anderen Gruppen. Auch stellt sich hier erneut der Unterschied zwischen Gruppe A und B als nicht signifikant dar ( $p=0,301$ ). Auch für den HRV-Parameter LH/HF-Ratio liegen die Mittelwerte von Gruppe D ( $\bar{x}(D)=3,90\pm 3,726$ ) höher als die Mittelwerte von Gruppe C ( $\bar{x}(C)=2,82\pm 2,844$ ), jedoch nicht höher als die aller anderen Gruppen. Der Unterschied zwischen den Gruppen C und D stellt sich wiederum als nicht signifikant dar ( $p=0,253$ ) (siehe Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: **Gruppenzugehörigkeit und LF/HF-Ratio (A/B, C/D)** Zur Überprüfung der Gruppenzugehörigkeit und LF/HF-Ratio erfolgte die Auswertung mittels ANCOVA. Die abhängige Variable ist hier der HRV-Parameter LF/HF-Ratio, die unabhängigen Variablen sind die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis ist die vom F-Test angezeigte Signifikanz des Gruppenunterschieds angegeben.

	LF/HF-Ratio	
Gruppe	Mittelwert	Standardabweichung
A	3,51	3,621
B	4,44	4,301
F-Test	F(1,61)=1,088, p=0,301	
C	2,82	2,844
D	3,90	3,726
F-Test	F(F(1,49)=1,340, p=0,253	

Es zeigen sich somit insbesondere bei SDNN und RMSSD ähnliche Tendenzen (mit Einschränkungen auch für die LF/HF-Ratio), jedoch können statistisch relevante Signifikanzen ausschließlich für die Unterschiede von Gruppe A und B sowie Gruppe C und D für den HRV-Parameter SDNN festgehalten werden. Die höher belasteten Gruppen A bzw. C weisen jeweils signifikant niedrigere SDNN-Werte als die weniger belasteten Gruppen B bzw. D auf.

Alle ermittelten Signifikanzen ändern sich nicht, wenn Alter und Einsatztage als Einflussgrößen berücksichtigt werden. In Abbildung 3.1 erfolgt ergänzend eine grafische Darstellung aller drei HRV-Parameter im Gruppenvergleich.

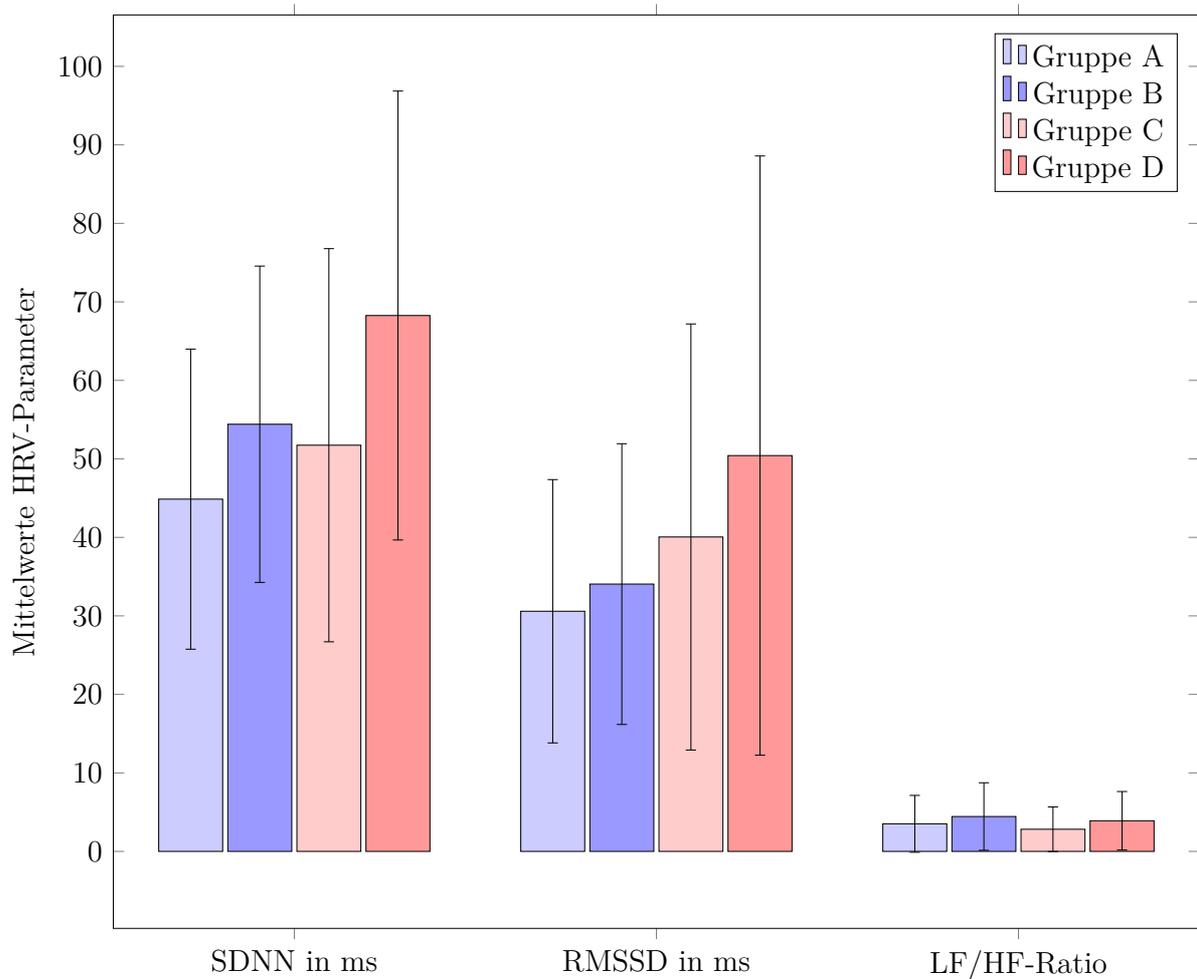


Abbildung 3.1: **Gruppenunterschiede (A/B, C/D) der HRV** Abgebildet werden die Mittelwerte  $\bar{x}$  und Standardabweichungen  $\sigma$  der HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio zum ersten Messzeitpunkt im Gruppenvergleich. Für den HRV-Parameter SDNN stellen sich die jeweiligen Unterschiede von Gruppe A und B ( $p=0,027$  durch F-Test angezeigt, Auswertung mittels ANCOVA) sowie Gruppe C und D ( $p=0,035$  durch F-Test angezeigt, Auswertung mittels ANCOVA) als signifikant dar, während dies weder für RMSSD noch für die LF/HF-Ratio gilt. Dabei stellt sich die Tendenz von RMSSD, wenn auch nicht statistisch signifikant, als gleichgerichtet zu SDNN dar, für die LF/HF-Ratio zeigt sich ein divergierendes Bild im Vergleich aller Probandengruppen.

### 3.2.2 Kann man mit der HRV die Gruppenzugehörigkeit der Probanden vorhersagen?

In einem weiteren Schritt wurde innerhalb des Querschnittsteils die Frage betrachtet, ob die zum ersten Messzeitpunkt erhobenen HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio eine Vorhersagefunktion für die Gruppenzugehörigkeit der Probanden darstellen. Die Auswertung erfolgte hierbei mittels Logistischer Regression. Hierbei wurden für die einzelnen HRV-Parameter die Signifikanz für die Gruppeneinteilung sowie der Prozentsatz der korrekten Zuordnungen in die jeweiligen Gruppen ermittelt.

Es zeigt sich, dargestellt in den Tabellen 3.6 - 3.8, dass erneut für SDNN eine statistische Signifikanz für die Gruppeneinteilung der Probanden festgehalten werden kann. Für die beiden anderen HRV-Parameter gilt dies wiederum nicht. Weiterhin zeigt sich keine Verbesserung der korrekten Klassifikationsrate, wenn die drei HRV-Parameter (zusammen mit Alter und Anzahl der Einsatztage) in einem gemeinsamen logistischen Regressionsmodell betrachtet werden. Für die Gruppen A und B sinkt dabei hinsichtlich SDNN die korrekte Klassifikationsrate von 73,8 % auf 72,3 % und somit hat keiner der drei HRV-Parameter im gemeinsamen Modell einen signifikanten Einfluss auf die Gruppeneinteilung. Für die Gruppen C und D steigt hinsichtlich SDNN dabei die korrekte Klassifikationsrate auf 71,7 %, und SDNN hat somit im Gesamtmodell immer noch einen signifikanten Einfluss auf die Gruppeneinteilung, die HRV-Parameter RMSSD und LF/HF-Ratio jedoch nach wie vor nicht.

Tabelle 3.6: **Vorhersagekraft von SDNN für die Gruppenzugehörigkeit** Zur Überprüfung der Vorhersagekraft von SDNN für die Gruppenzugehörigkeit erfolgte die Auswertung mittels Logistischer Regression. Die abhängige Variable ist hier die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), die unabhängigen Variablen sind SDNN, das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis sind die Signifikanz von SDNN für die Gruppeneinteilung sowie der Prozentsatz der korrekten Zuordnungen in die Gruppen angegeben.

	SDNN
Gruppe A/B	Wald=4,557, <b>p=0,033</b> korrekte Klassifikationsrate=73,8 %
Gruppe C/D	Wald=4,146, <b>p=0,042</b> korrekte Klassifikationsrate=66,0 %

Entsprechend Tabelle 3.6 stellt sich der Einfluss von SDNN für die Einteilung der Probanden in die Gruppen A (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS) und B (Soldaten mit Einsatzerfahrung ohne PTBS) als signifikant dar ( $p=0,033$ ). Die korrekte Klassifikationsrate liegt hier

bei 73,8 %. Werden alle drei HRV-Parameter in einem gemeinsamen Regressionsmodell betrachtet, so sinkt diese auf 72,3 % und stellt sich als statistisch nicht mehr signifikant dar. Für die Einteilung der Probanden in die Gruppen C (Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit höherer chronischer Stressbelastung) und D (Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit moderater chronischer Stressbelastung) ist der Einfluss von SDNN ebenfalls signifikant ( $p=0,042$ ). Die korrekte Klassifikationsrate liegt hier bei 66,0 % und steigt in einem gemeinsamen Regressionsmodell aller drei HRV-Parameter sogar auf 71,7 %. Eine statistische Signifikanz bleibt somit erhalten.

Tabelle 3.7: **Vorhersagekraft von RMSSD für die Gruppenzugehörigkeit** Zur Überprüfung der Vorhersagekraft von RMSSD für die Gruppenzugehörigkeit erfolgte die Auswertung mittels Logistischer Regression. Die abhängige Variable ist hier die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), die unabhängigen Variablen sind RMSSD, das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis sind die Signifikanz von RMSSD für die Gruppeneinteilung sowie der Prozentsatz der korrekten Zuordnungen in die Gruppen angegeben.

	RMSSD
Gruppe A/B	Wald=1,761, $p=0,185$ korrekte Klassifikationsrate=70,8 %
Gruppe C/D	Wald=1,099, $p=0,294$ korrekte Klassifikationsrate=62,3 %

Tabelle 3.8: **Vorhersagekraft der LF/HF-Ratio für die Gruppenzugehörigkeit** Zur Überprüfung der Vorhersagekraft der LF/HF-Ratio für die Gruppenzugehörigkeit erfolgte die Auswertung mittels Logistischer Regression. Die abhängige Variable ist hier die Gruppenzugehörigkeit (A/B, C/D jeweils separat), die unabhängigen Variablen sind die LF/HF-Ratio, das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis sind die Signifikanz der LF/HF-Ratio für die Gruppeneinteilung sowie der Prozentsatz der korrekten Zuordnungen in die Gruppen angegeben.

	LF/HF-Ratio
Gruppe A/B	Wald=1,026, $p=0,311$ korrekte Klassifikationsrate=66,2 %
Gruppe C/D	Wald=1,369, $p=0,242$ korrekte Klassifikationsrate=67,9 %

Der Einfluss von RMSSD stellt sich anders als jener von SDNN für die Einteilung der Probanden in die Gruppen A und B als statistisch nicht signifikant dar ( $p=0,185$ ). Für RMSSD liegt die korrekte Klassifikationsrate für die Einteilung in die Gruppen A und B bei 70,8 %. In einem gemeinsamen Regressionsmodell aller drei HRV-Parameter bleibt der Einfluss nicht signifikant. Auch für die Einteilung der Probanden in die Gruppen C und D ist der Einfluss von RMSSD nicht signifikant ( $p=0,294$ ). Die korrekte Klassifikationsrate für die Gruppeneinteilung liegt bei 62,3 %. Auch hier ergibt sich durch ein gemeinsames Regressionsmodell keine neue Signifikanz (siehe Tabelle 3.7).

Ähnliches wie für RMSSD gilt für den Einfluss der LF/HF-Ratio für die Einteilung der Probanden in die Gruppen A und B. Dieser stellt sich ebenfalls als nicht signifikant dar ( $p=0,311$ ). Für diesen HRV-Parameter liegt die korrekte Klassifikationsrate bei 66,2 %. Auch für die Einteilung der Probanden in die Gruppen C und D ist der Einfluss der LF/HF-Ratio nicht signifikant ( $p=0,242$ ). Die korrekte Klassifikationsrate liegt hier bei 67,9 %. Weder für die Einteilung der Probanden in die Gruppen A und B, noch für die Einteilung in die Gruppen C und D ergeben sich neue Signifikanzen in einem gemeinsamen Regressionsmodell mit allen drei HRV-Parametern (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio) (siehe Tabelle 3.8).

### **3.2.3 Korrelation von Herzfrequenzvariabilität und Symptomlast**

Weiterhin sollte im Querschnittsteil beurteilt werden, ob die erhobenen HRV-Parameter mit der Symptomlast der verschiedenen Gruppen korrelieren. Die Ermittlung der Symptomlast erfolgte hierbei durch die Anwendung der Selbstauskunftsfragebögen BSI, genauer dem GSI des BSI, und PDS. Die Auswertung erfolgte mittels Regressionsanalyse. Es wurde für die einzelnen HRV-Parameter die Signifikanz für die Korrelation mit der Symptomlast sowie die Anpassungsqualität ermittelt.

Es zeigt sich, dargestellt in den Tabellen 3.9 und 3.10, dass SDNN signifikant fällt, wenn die Belastung in den Gruppen A (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS) und B (Soldaten mit Einsatzerfahrung ohne PTBS) steigt. Ebenso fällt RMSSD signifikant, wenn der GSI-BSI in den Gruppen A und B steigt. LF/HF-Ratio hingegen steigt, wenn der PDS in den Gruppen C (Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit höherer chronischer Stressbelastung) und D (Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit moderater chronischer Stressbelastung) steigt. Dies widerspricht dem vorangegangenen Ergebnis, dass die LF/HF-Ratio in der höher belasteten Gruppe C einen (allerdings nicht signifikant) niedrigeren Wert als in der weniger belasteten Gruppe D hat, entspräche jedoch bei entsprechender Belastbarkeit den Ursprungshypothesen. Auch hier verbessert sich die Anpassungsqualität (dargestellt durch  $r^2$ ) nicht wesentlich, wenn alle drei Herzfrequenzparameter in einem gemeinsamen Modell betrachtet werden. Das Alter zeigt bei Betrachtung der Gruppen A und B ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Belastung,

diese sinkt mit steigendem Alter. Dies entspricht dem Ergebnis der demographischen Daten, wonach die höher belastete Gruppe A signifikant jünger ist als die weniger belastete Gruppe B.

Tabelle 3.9: **Symptomlast (BSI-GSI) und HRV (A/B, C/D)** Zur Überprüfung der Korrelation der Symptomlast, gemessen mittels BSI-GSI, und der HRV erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Symptomlast (BSI-GSI), die Einflussgrößen sind jeweils separat die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio), das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis sind die Signifikanz der Korrelation der HRV-Parameter mit der Symptomlast (BSI-GSI) und die Anpassungsfähigkeit als  $r^2$  angegeben.

BSI-GSI	SDNN	RMSSD	LF/HF-Ratio
Gruppe A/B	t(61)=-3,133, p=0,003 r <sup>2</sup> =0,205	t(61)=-2,303, p=0,025 r <sup>2</sup> =0,151	t(61)=-0,364, p=0,717 r <sup>2</sup> =0,079
Gruppe C/D	t(47)=-0,791, p=0,433 r <sup>2</sup> =0,033	t(47)=-1,080, p=0,286 r <sup>2</sup> =0,043	t(47)=1,089, p=0,282 r <sup>2</sup> =0,044

Für den HRV-Parameter SDNN kann mit statistischer Signifikanz eine Korrelation der Symptomlast, hier gemessen durch BSI-GSI, festgestellt werden (p=0,003). Allerdings gilt dies nur für die Gruppen A und B. Steigt in diesen beiden Gruppen die Belastung signifikant, so erniedrigt sich signifikant SDNN. Innerhalb selbiger Gruppen gilt dies mit statistischer Signifikanz auch für RMSSD (p=0,025). Auch RMSSD erniedrigt sich signifikant, wenn die Symptomlast in den Gruppen A und B signifikant steigt. Für die Gruppen C und D kann dies weder für SDNN (p=0,433) noch für RMSSD (p=0,286) nachgewiesen werden, für die LF/HF-Ratio weder für die Gruppen A und B (p=0,717) noch für die Gruppen C und D (p=0,282). Auch in einem gemeinsamen Modell aller drei HRV-Parameter verbessert sich die Anpassungsfähigkeit (dargestellt durch  $r^2$ ) nicht (siehe Tabelle 3.9).

Für SDNN kann ebenfalls eine statistisch signifikante Korrelation mit der Symptomlast, gemessen im PDS, ermittelt werden (p=0,031). Auch hier gilt dies für SDNN ausschließlich für die Gruppen A und B. SDNN erniedrigt sich, sobald die Symptomlast in den Gruppen A und B steigt. In Gruppe C und D kann keine Signifikanz festgestellt werden (p=0,105). Für RMSSD kann weder für die Gruppen A und B (p=0,190) noch für die Gruppen C und D (p=0,149) eine statistisch signifikante Korrelation festgehalten werden. Für die LF/HF-Ratio kann zwar in den Gruppen A und B (p=0,461) keine statistisch signifikante Korrelation festgestellt werden, dafür jedoch in den Gruppen C und D (p=0,041). Steigt in den Gruppen C und D die Symptomlast, gemessen durch den PDS, signifikant, so steigt auch der HRV-Parameter LF/HF-Ratio signifikant (siehe Tabelle 3.10).

Tabelle 3.10: **Symptomlast (PDS) und HRV (A/B, C/D)** Zur Überprüfung der Korrelation der Symptomlast, gemessen mittels PDS, und der HRV erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Symptomlast (PDS), die Einflussgrößen sind jeweils separat die HRV-Parameter (SDNN, RMSSD, LF/HF-Ratio), das Alter und die Anzahl der Einsatztage. Als Ergebnis sind die Signifikanz der Korrelation der HRV-Parameter mit der Symptomlast (PDS) und die Anpassungsfähigkeit als  $r^2$  angegeben.

PDS	SDNN	RMSSD	LF/HF-Ratio
Gruppe A/B	t(59)=-2,215, <b>p=0,031</b> $r^2=0,196$	t(59)=-1,325, p=0,190 $r^2=0,154$	t(59)=-0,742, p=0,461 $r^2=0,137$
Gruppe C/D	t(37)=-1,669, p=0,104 $r^2=0,105$	t(37)=-1,475, p=0,149 $r^2=0,092$	t(37)=2,121, <b>p=0,041</b> $r^2=0,142$

In Zusammenschau korreliert SDNN in den Gruppen A und B signifikant sowohl mit der durch BSI-GSI als auch mit der durch PDS gemessenen Symptomlast. Eine höhere Symptomlast geht mit niedrigeren SDNN-Werten einher. Weitere signifikante Korrelationen finden sich in den Gruppen A und B zwischen dem HRV-Parameter RMSSD und BSI-GSI sowie in den Gruppen C und D zwischen der LF/HF-Ratio und PDS. Erstere Korrelation ist wie bei SDNN negativ, die zweite ist positiv.

### 3.3 Längsschnittteil

#### 3.3.1 Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität und Korrelation mit der Änderung der Symptomlast

Im Längsschnittteil sollte in einem ersten Schritt die potentielle Korrelation der HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio und deren Änderung zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt mit der Änderung der Symptomlast (gemessen durch BSI-GSI und PDS) untersucht werden. Dabei sollte weiterhin betrachtet werden, ob es bezüglich dieser Fragestellung einen Unterschied zwischen den Untergruppen As (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Psychotherapie) und Aw (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne stationäre Psychotherapie) gibt. Hierfür müssen zuerst sowohl die Änderung der Symptomlast als auch die Änderung der einzelnen HRV-Parameter zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt betrachtet werden.

## Änderung der Symptomlast zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt

Es folgt in den Tabellen 3.11 und 3.12 die Darstellung der Entwicklung über zwei Messzeitpunkte. Mittels t-Test wurde überprüft, inwieweit sich Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten als statistisch signifikant darstellen. Bei allen Residuen und bei den Differenzwerten bestätigt der Kolmogorov-Smirnov-Test die Normalverteilung, sodass der t-Test als parametrischer Test hier anwendbar war. Der Mittelwert wird hier tabellarisch folgend mit  $M$ , die Standardabweichung mit  $SD$ , die Messzeitpunkte werden mit  $MZP$  bezeichnet. Es zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Symptomatik in der Gesamtgruppe A bei beiden Belastungsmaßen (BSI-GSI und PDS) zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt. In den Untergruppen zeigt sich diese Verbesserung zwar ebenfalls, ist aber statistisch nicht signifikant. Bei Berücksichtigung von Alter und Einsatztagen bleibt keine Signifikanz in der Gruppe A erhalten, andere Signifikanzen kommen nicht hinzu.

Für den Messwert GSI des BSI zeigt sich, dass dieser in der Gesamtgruppe A zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt statistisch signifikant abnimmt ( $p=0,044$ ). Zum ersten Messzeitpunkt liegt dieser bei  $\bar{x}(A)=1,588\pm 0,7543$ , zum zweiten bei  $\bar{x}(A)=1,395\pm 0,8496$ . Es ergibt sich somit ein Unterschied von  $\Delta\bar{x}(A)=-0,1632\pm 0,41595$ , der sich als signifikant darstellt. In den Untergruppen zeigt sich diese Tendenz ebenfalls. In Gruppe As nimmt der GSI zwischen erstem und zweiten Messzeitpunkt mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(As)=-0,2214\pm 0,47129$  ab, in Gruppe Aw mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(Aw)=-0,1008\pm 0,35405$ . Beide Unterschiede stellen sich jedoch nicht als statistisch signifikant dar (siehe Tabelle 3.11).

Tabelle 3.11:  $\Delta$  BSI-GSI zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt Es werden die Änderung der Symptomlast zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt dargestellt, mittels t-Test wurde überprüft, inwieweit sich die Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten und zwischen den beiden Probandengruppen As und Aw als statistisch signifikant darstellen.

BSI-GSI	1. MZP		2. MZP		$\Delta$ BSI-GSI		
	M	SD	M	SD	M	SD	t-Test
A (n=29)	1,558	0,7543	1,395	0,8496	-0,1632	0,41595	t(28)=2,112 p=0,044
As (n=15)	1,806	0,8293	1,585	0,9305	-0,2214	0,47129	t(14)=1,819 p=0,090
Aw (n=14)	1,292	0,5808	1,191	0,7319	-0,1008	0,35405	t(13)=1,065 p=0,306
t-Test	t(27)=1,922 p=0,065		t(27)=1,261 p=0,218		t(27)=0,775 p=0,445		

Auch für den PDS zeigt sich, dass dieser in der Gesamtgruppe A zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt statistisch signifikant abnimmt ( $p=0,034$ ). Liegt dieser zum ersten Messzeitpunkt noch bei  $\bar{x}(A)=1,969\pm 0,5792$ , so kann zum zweiten Messzeitpunkt ein PDS von  $\bar{x}(A)=1,734\pm 0,7291$  festgehalten werden. Damit ergibt sich, analog zum BSI-GSI, ein signifikanter Unterschied von  $\Delta\bar{x}(A)=-0,2353\pm 0,54599$ . Auch beim PDS zeigt sich diese Abnahmetendenz in beiden Untergruppen. Der PDS in Gruppe As nimmt zwischen den Messzeitpunkten mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(As)=-0,2196\pm 0,55914$  ab, in der Gruppe Aw mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(Aw)=-0,2549\pm 0,55314$ . Ebenfalls stellen sich auch für den PDS beide Unterschiede wiederum nicht als statistisch signifikant dar (siehe Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12:  $\Delta$  PDS-gesamt zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt Es werden die Änderung der Symptomlast zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt dargestellt, mittels t-Test wurde überprüft inwieweit sich die Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten und zwischen den beiden Probandengruppen As und Aw als statistisch signifikant darstellen.

PDS-gesamt	1. MZP		2. MZP		$\Delta$ PDS-gesamt		
	M	SD	M	SD	M	SD	t-Test
A (n=27)	1,969	0,5792	1,734	0,7291	-0,2353	0,54599	t(26)=2,239 p=0,034
As (n=15)	2,114	0,4359	1,894	0,7534	-0,2196	0,55914	t(14)=1,521 p=0,150
Aw (n=12)	1,789	0,6980	1,534	0,6751	-0,2549	0,55314	t(11)=1,596 p=0,139
t-Test	t(25)=1,479 p=0,152		t(25)=1,290 p=0,209		t(25)=0,164 p=0,871		

### Änderung der Herzfrequenzwerte zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt

In einem weiteren Schritt wird die Veränderung der jeweiligen HRV-Parameter zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt betrachtet. Auch für die HRV-Parameter wurde mittels t-Test überprüft, inwieweit sich Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten als statistisch signifikant darstellen. Bei allen Residuen, mit Ausnahme der Residuen des HRV-Parameters LF/HF-Ratio am ersten Messzeitpunkt, und bei den Differenzwerten bestätigt der Kolmogorov-Smirnov-Test erneut die Normalverteilung, sodass der t-Test als parametrischer Test hier anwendbar war.

Es zeigt sich, dargestellt in den Tabellen 3.13 und 3.14, dass SDNN und RMSSD in Untergruppe As zum zweiten Messzeitpunkt signifikant zunehmen. In Untergruppe Aw bleiben sie

ungefähr konstant, sodass sich der Unterschied zwischen den beiden Untergruppen bei der Veränderung ebenfalls signifikant darstellt. Bei Berücksichtigung von Alter und Einsatztagen bleiben keine Signifikanzen innerhalb der Gruppe As erhalten, wenn auch die Signifikanz beider Gruppenunterschiede Bestand hat. Weitere Signifikanzen kommen nicht hinzu.

Tabelle 3.13:  $\Delta$  SDNN zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt Es wird die Entwicklung von SDNN zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt dargestellt, mittels t-Test wurde überprüft, inwieweit sich die Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten und zwischen den beiden Probandengruppen As und Aw als statistisch signifikant darstellen.

SDNN	1. MZP		2. MZP		$\Delta$ SDNN		
Gruppe	M	SD	M	SD	M	SD	t-Test
A (n=31)	44,39	19,819	50,78	25,649	6,392	21,4647	t(30)=1,658 p=0,108
As (n=15)	38,53	20,218	53,97	32,224	15,440	25,3966	t(14)=2,355 p=0,034
Aw (n=16)	49,88	18,373	47,79	18,079	-2,090	12,6833	t(15)=0,659 p=0,520
t-Test	t(29)=1,637 p=0,112		t(29)=0,664 p=0,512		t(29)=2,456 p=0,020		

Tabelle 3.14:  $\Delta$  RMSSD zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt Es wird die Entwicklung von RMSSD zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt dargestellt, mittels t-Test wurde überprüft, inwieweit sich die Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten und zwischen den beiden Probandengruppen As und Aw als statistisch signifikant darstellen.

RMSSD	1. MZP		2. MZP		$\Delta$ RMSSD		
Gruppe	M	SD	M	SD	M	SD	t-Test
A (n=31)	29,66	16,880	37,53	35,601	7,869	26,1684	t(30)=1,674 p=0,104
As (n=15)	26,28	18,908	44,87	47,672	18,589	33,2310	t(14)=2,167 p=0,048
Aw (n=16)	32,82	14,632	30,64	17,585	-2,181	10,7813	t(15)=0,809 p=0,431
t-Test	t(29)=1,082 p=0,288		t(29)=1,116 p=0,273		t(29)=2,373 p=0,025		

Für die Entwicklung von SDNN zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt sich in der Gesamtgruppe A eine Zunahme von  $\bar{x}(A)=6,392\pm 21,4647$ , jedoch ohne statistische Signifikanz ( $p=0,108$ ). Hingegen nimmt SDNN in der Gruppe As von  $\bar{x}(As)=38,53\pm 20,218$  auf  $\bar{x}(As)=53,97\pm 32,224$  mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(As)=15,440\pm 25,3966$  zu. Dieser Unterschied stellt sich als signifikant dar ( $p=0,034$ ). In der Gruppe Aw vermindert sich SDNN zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt geringfügig mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2,090\pm 12,6833$ , sodass der Unterschied der Veränderungen von SDNN zwischen den Gruppen As und Aw selbst signifikant ist ( $p=0,020$ ) (siehe Tabelle 3.13).

Auch für die Entwicklung von RMSSD zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt zeigt sich in der Gesamtgruppe A eine Zunahme von  $\bar{x}(A)=7,869\pm 26,1684$ , die sich jedoch wie bei SDNN als nicht signifikant darstellt ( $p=0,104$ ). Wiederum in Gruppe As nimmt auch RMSSD zwischen beiden Messzeitpunkten von  $\bar{x}(As)=26,28\pm 18,908$  auf  $\bar{x}(As)=44,87\pm 47,672$  mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(As)=18,589\pm 33,2310$  zu. Auch hier liegt ein signifikanter Unterschied vor ( $p=0,048$ ). Auch RMSSD vermindert sich in der Gruppe Aw vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt geringfügig mit einem Unterschied von  $\Delta\bar{x}(Aw)=-2,181\pm 10,7813$ , sodass der Unterschied der Veränderungen von RMSSD zwischen den Gruppen As und Aw selbst signifikant ist ( $p=0,025$ ) (siehe Tabelle 3.14).

Tabelle 3.15:  $\Delta$  LF/HF-Ratio zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt Es wird die Entwicklung der LF/HF-Ratio zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt dargestellt, mittels t-Test wurde überprüft, inwieweit sich die Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten und zwischen den beiden Probandengruppen As und Aw als statistisch signifikant darstellen.

LF/HF-Ratio	1. MZP		2. MZP		$\Delta$ LF/HF-Ratio		
	M	SD	M	SD	M	SD	t-Test
A (n=31)	3,730	3,7954	3,030	2,3067	-0,7002	3,86284	t(30)=1,009 p=0,321
As (n=15)	3,028	2,3592	3,298	2,7912	0,2708	2,91594	t(14)=0,360 p=0,724
Aw (n=16)	4,389	4,7602	2,778	1,7972	-1,6105	4,48111	t(15)=1,438 p = 0,171
t-Test	t(29)=0,998 p=0,327		t(29)=0,621 p=0,540		t(29)=1,375 p=0,180		

Für die LF/HF-Ratio stellt sich die Entwicklung zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt different zu SDNN und RMSSD dar. Es zeigt sich in der Gesamtgruppe A eine Verringerung von  $\Delta\bar{x}(A)=-0,7002\pm 3,86284$ , in der Gruppe As eine Zunahme von  $\Delta\bar{x}(As)=0,2708\pm 2,91594$

und in der Gruppe Aw wiederum eine Verringerung von  $\Delta\bar{x}(Aw)=-1,6105\pm 4,48111$ . Weder die Unterschiede zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt, noch die Unterschiede zwischen den Gruppen As und Aw erweisen sich hier als statistisch signifikant (siehe Tabelle 3.15). In Abbildung 3.2 erfolgt ergänzend eine grafische Darstellung der Entwicklung aller drei HRV-Parameter zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt im Gruppenvergleich.

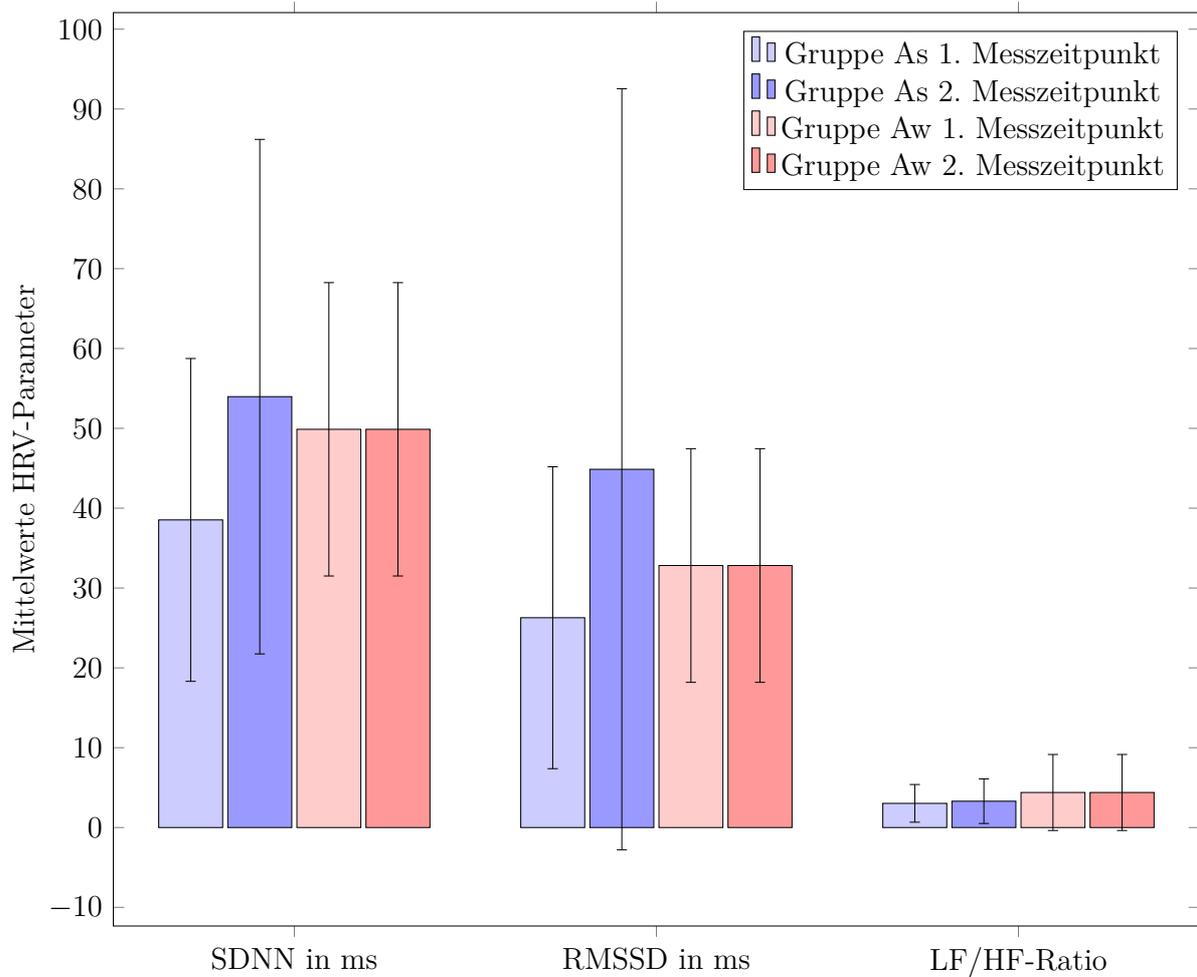


Abbildung 3.2: **Änderung der HRV zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt**

Abgebildet werden die Mittelwerte  $\bar{x}$  und Standardabweichungen  $\sigma$  der HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio zum ersten und zweiten Messzeitpunkt im Gruppenvergleich. Die Mittelwerte der HRV-Parameter SDNN ( $p=0,034$  durch t-Test angezeigt) und RMSSD ( $p=0,048$  durch t-Test angezeigt) nehmen in der Gruppe As signifikant zu, während sie in der Gruppe Aw auf einem annähernd gleichen Niveau verbleiben. Wiederum können die gleichgerichteten Tendenzen für SDNN und RMSSD nicht für die LF/HF-Ratio festgehalten werden.

## Korrelationen zwischen der Herzfrequenzvariabilität und Änderung der Symptomlast

Nach Beschreibung der Veränderungen der Symptomlast sowie der Veränderungen der HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio zwischen erstem und zweitem Messzeitpunkt, erfolgt die Betrachtung, inwieweit die jeweiligen HRV-Parameter oder deren Änderung mit der Änderung der Symptomlast im Therapieverlauf bei Gruppe As bzw. im Warteintervall bei Gruppe Aw korrelieren. Weder zeigen die HRV-Parameter noch deren Änderung einen signifikanten Einfluss auf die Änderung der Belastungswerte (siehe Tabellen 3.16 - 3.19).

Tabelle 3.16: **Einfluss der HRV am ersten Messzeitpunkt auf  $\Delta$  BSI-GSI** Zur Überprüfung der Korrelation der HRV mit der Änderung von BSI-GSI erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Änderung der Symptomlast  $\Delta$  BSI-GSI vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt, die Einflussgrößen sind jeweils separat die HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio, das Alter und die Anzahl der Einsatztage.

$\Delta$ BSI-GSI	SDNN	RMSSD	LF/HF-Ratio
Gruppe A (n=29)	t(25)=0,941, p=0,356 r <sup>2</sup> =0,125	t(25)=0,812, p=0,424 r <sup>2</sup> =0,117	t(25)=-0,914, p=0,370 r <sup>2</sup> =0,123
Gruppe As (n=15)	t(11)=0,898, p=0,388 r <sup>2</sup> =0,266	t(11)=0,638, p=0,537 r <sup>2</sup> =0,241	t(11)=-0,037, p=0,971 r <sup>2</sup> =0,213
Gruppe Aw (n=14)	t(10)=0,197, p=0,847 r <sup>2</sup> =0,184	t(10)=0,247, p=0,810 r <sup>2</sup> =0,185	t(10)=-1,163, p=0,272 r <sup>2</sup> =0,278

Tabelle 3.17: **Einfluss der HRV am ersten Messzeitpunkt auf  $\Delta$  PDS-gesamt** Zur Überprüfung der Korrelation der HRV mit der Änderung von PDS-gesamt erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Änderung der Symptomlast  $\Delta$  PDS-gesamt vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt, die Einflussgrößen sind jeweils separat die HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio, das Alter und die Anzahl der Einsatztage.

$\Delta$ PDS-gesamt	SDNN	RMSSD	LF/HF-Ratio
Gruppe A (n=27)	t(23)=0,357, p=0,724 r <sup>2</sup> =0,174	t(23)=0,491, p=0,628 r <sup>2</sup> =0,178	t(23)=-0,731, p=0,472 r <sup>2</sup> =0,188
Gruppe As (n=15)	t(11)=1,374, p=0,197 r <sup>2</sup> =0,398	t(11)=1,329, p=0,211 r <sup>2</sup> =0,391	t(11)=-0,660, p=0,523 r <sup>2</sup> =0,322
Gruppe Aw (n=12)	t(8)=-1,847, p=0,102 r <sup>2</sup> =0,334	t(8)=-1,072, p=0,315 r <sup>2</sup> =0,169	t(8)=-0,406, p=0,695 r <sup>2</sup> =0,069

Tabelle 3.18: **Einfluss von  $\Delta$  HRV auf  $\Delta$  BSI-GSI** Zur Überprüfung der Korrelation der Änderung der HRV mit der Änderung von BSI-GSI erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Änderung der Symptomlast  $\Delta$  BSI-GSI vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt, die Einflussgrößen sind jeweils separat die Änderung der HRV  $\Delta$  SDNN,  $\Delta$  RMSSDN und  $\Delta$  LF/HF-Ratio, das Alter und die Anzahl der Einsatztage.

$\Delta$ BSI-GSI	$\Delta$ SDNN	$\Delta$ RMSSD	$\Delta$ LF/HF-Ratio
Gruppe A (n=28)	t(24)=-1,279, p=0,213 r <sup>2</sup> =0,154	t(24)=-1,282, p=0,212 r <sup>2</sup> =0,154	t(24)=1,599, p=0,123 r <sup>2</sup> =0,183
Gruppe As (n=15)	t(11)=-0,611, p=0,553 r <sup>2</sup> =0,238	t(11)=-0,126, p=0,902 r <sup>2</sup> =0,214	t(11)=0,600, p=0,561 r <sup>2</sup> =0,238
Gruppe Aw (n=13)	t(9)=-0,213, p=0,836 r <sup>2</sup> =0,233	t(9)=-1,068, p=0,313 r <sup>2</sup> =0,316	t(9)=1,218, p=0,254 r <sup>2</sup> =0,339

Tabelle 3.19: **Einfluss von  $\Delta$  HRV auf  $\Delta$  PDS-gesamt** Zur Überprüfung der Korrelation der Änderung der HRV mit der Änderung von PDS-gesamt erfolgte die Auswertung mittels Regressionsanalyse. Die abhängige Variable ist hier die Änderung der Symptomlast  $\Delta$  PDS-gesamt vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt, die Einflussgrößen sind jeweils separat die Änderung der HRV  $\Delta$  SDNN,  $\Delta$  RMSSDN und  $\Delta$  LF/HF-Ratio, das Alter und die Anzahl der Einsatztage.

$\Delta$ PDS-gesamt	$\Delta$ SDNN	$\Delta$ RMSSD	$\Delta$ LF/HF-Ratio
Gruppe A (n=26)	t(22)=0,083, p=0,934 r <sup>2</sup> =0,153	t(22)=0,040, p=0,969 r <sup>2</sup> =0,153	t(22)=-0,353, p=0,727 r <sup>2</sup> =0,158
Gruppe As (n=15)	t(11)=0,031, p=0,976 r <sup>2</sup> =0,295	t(11)=0,827, p=0,426 r <sup>2</sup> =0,336	t(11)=-0,972, p=0,352 r <sup>2</sup> =0,351
Gruppe Aw (n=11)	t(7)=0,798, p=0,451 r <sup>2</sup> =0,109	t(7)=-0,543, p=0,604 r <sup>2</sup> =0,067	t(7)=0,537, p=0,608 r <sup>2</sup> =0,066

### 3.3.2 Entwicklung der HRV-Parameter über drei Messzeitpunkte

Im Längsschnittteil wurden insgesamt 15 Probanden der Gruppe As (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Therapie) noch zu einem dritten Messzeitpunkt ca. drei Monate nach Abschluss der Therapie (und somit nach dem zweiten Messzeitpunkt) untersucht. Aufgrund der geringen verbleibenden Probandenanzahl werden die Ergebnisse im Folgenden rein deskriptiv dargestellt (siehe Tabelle 3.20). Einer der 15 Probanden wurde zum ersten und

dritten, aber nicht zum zweiten Messzeitpunkt untersucht. Dessen Daten sind in den Auswertungen soweit vorhanden berücksichtigt. Der Vollständigkeit halber wird eine Darstellung der Entwicklung der HRV-Parameter über alle Messzeitpunkte präsentiert. Es zeigt sich sowohl bei SDNN als auch bei RMSSD eine signifikante Zunahme der HRV zum zweiten Messzeitpunkt, zum dritten Messzeitpunkt hingegen ebenfalls bei beiden Parametern eine Abnahme auf das annähernde Ausgangsniveau vom ersten Messzeitpunkt. Für die LF/HF-Ratio zeigt sich nahezu keine Veränderung zum zweiten Messzeitpunkt, hingegen eine Zunahme zum dritten.

**Tabelle 3.20: Veränderung von SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio während und nach Therapie bei Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe As)**  
 Zur Betrachtung der Änderung der HRV während und nach Durchführung einer stationären Psychotherapie wurden 15 Probanden der Gruppe As noch zu einem dritten Messzeitpunkt ca. drei Monate nach dem zweiten Messzeitpunkt untersucht.

	1. MZP	2. MZP	3. MZP	$\Delta 21$	$\Delta 31$
SDNN					
M	39,983	56,229	41,007	16,994	1,024
SD	20,3394	34,4784	17,4012	28,3705	19,1673
RMSSD					
M	27,428	46,026	24,975	19,426	-2,453
SD	19,5323	50,6723	19,1173	35,8003	15,5938
LF/HF-Ratio					
M	3,2661	3,2072	4,5694	-0,2168	1,3033
SD	2,54806	2,43745	6,20793	2,20257	6,64784

## 4 Diskussion

In Zusammenschau der vorangehend beschriebenen Ergebnisse konnte für den Querschnittsteil dieser Arbeit gezeigt werden, dass sich insbesondere der HRV-Parameter SDNN zwischen einsatzerfahrenen gesunden Soldaten und jenen mit einer einsatzbedingten PTBS unterscheidet, als auch zwischen einsatzerfahrenen Soldaten mit höherem und moderatem chronischen Stressniveau im Dienst. Auch konnte gezeigt werden, dass die HRV-Parameter SDNN sowie z. T. auch RMSSD mit der Symptomlast einsatzerfahrener Soldaten (gemessen durch BSI-GSI und PDS) korrelieren. Für den Längsschnittteil konnte gezeigt werden, dass wiederum die HRV-Parameter SDNN und RMSSD für Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS im Rahmen eines stationären Psychotherapiesettings zunahmen, während sie ohne Therapie annähernd auf ihrem Ausgangsniveau verblieben.

Diese und weitere Ergebnisse sollen folgend genauer betrachtet und interpretiert werden. Dabei wird diskutiert, ob sich die betrachteten HRV-Parameter im Sinne eines Screeningparameters zur Unterscheidung von Soldaten mit und ohne einsatzbedingte PTBS sowie von Soldaten mit unterschiedlichen Stressniveaus eignen und ob sie als Marker der Symptomlast einer einsatzbedingten PTBS eine Ergänzung bereits bestehender Diagnostikinstrumente der PTBS darstellen können. In einem weiteren Schritt soll diskutiert werden, inwieweit die betrachteten HRV-Parameter im Sinne eines Therapieverlaufparameters geeignet sind, den Therapieverlauf und die Änderung der Symptomlast im Laufe einer Therapie von Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS zu charakterisieren.

### 4.1 Herzfrequenzvariabilität, Gruppenzugehörigkeit und Symptomlast

Ziel des querschnittlichen Teils dieser Arbeit war es, die untersuchten HRV-Parameter hinsichtlich ihrer Eignung als Screeningparameter Posttraumatischer Belastungsstörungen sowie zur Differenzierung psychischer Belastungs- und Anspannungsniveaus, auch unabhängig vom Vorliegen manifester psychischer Erkrankungen, zu beurteilen. Hierzu wurde der Zusammenhang einer veränderten HRV und unterschiedlicher Stressbelastung (moderate und höhere chronische Stressbelastung im Dienst) bei Bundeswehrsoldaten betrachtet, untersucht, ob das Erleben traumatischer Ereignisse, insbesondere das Vorliegen einer PTBS die HRV beeinflussen und diese Veränderung mit der Symptomlast einer PTBS korreliert.

### **4.1.1 Herzfrequenzvariabilität von Soldaten mit einsatzbedingter posttraumatischer Belastungsstörung und einsatzerfahrenen gesunden Soldaten**

#### **Gruppenunterschiede der Herzfrequenzvariabilität bei einsatzerfahrenen Soldaten**

In den Auswertungen des Ergebnisteils konnte gezeigt werden, dass hinsichtlich der HRV Unterschiede, z. T. mit statistischer Signifikanz, zwischen den Probandengruppen von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe A) und einsatzerfahrenen Soldaten ohne PTBS (Gruppe B) bestehen. Insbesondere der Parameter SDNN hatte signifikant niedrigere Werte in Gruppe A als in Gruppe B. Für den Parameter RMSSD gilt dies zwar auch, jedoch nicht auf statistisch signifikantem Niveau. Somit lässt sich festhalten, dass sich insbesondere SDNN zwischen den Gruppen von einsatzerfahrenen Soldaten mit und solchen ohne PTBS signifikant in Form einer Verminderung unterscheidet. Dies entspricht für einen der drei untersuchten HRV-Parametern den zuvor entwickelten Hypothesen.

SDNN stellt die Standardabweichung aller NN-Intervalle einer EKG-Messung dar. Als Parameter des Zeitbereiches gilt SDNN in seiner physiologischen Bedeutung als ein Maß der Gesamtvariabilität. Eine klare Zuordnung zum sympathischen oder parasympathischen Anteil des autonomen Nervensystems sowie dessen Aktivität ist durch ihn somit, mit Einschränkungen, nicht möglich. Allerdings resultiert eine Verminderung der Gesamtvariabilität der HRV in der Regel entweder durch eine gesteigerte Noradrenalinfreisetzung, welche durch den Sympathikus vermittelt wird [54], oder durch eine verminderte, durch den Parasympathikus vermittelte, Acetylcholinfreisetzung. Es kann also an dieser Stelle vermutet werden, dass in der Gruppe von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS eine verminderte Parasympathikus- und/oder eine gesteigerte Sympathikusaktivität zur Verminderung der HRV-Gesamtvariabilität in dieser Gruppe führen. Ein weiterer Hinweis für diese Lesart kann im HRV-Parameter RMSSD gesehen werden, welcher sich in Gruppe A ebenfalls vermindert gegenüber Gruppe B darstellt. Da sich diese Verminderung jedoch nicht als statistisch signifikant darstellt, kann hier nur von einer bestätigenden Tendenz gesprochen werden. Auch bei RMSSD handelt es sich um einen Parameter des Zeitbereiches. Er gilt als Standardmaß für das Aktivitätsmaß des Parasympathikus bei der physiologischen Herzregulation. Ein weiterer Hinweis wäre an dieser Stelle, entsprechend der zu Grunde liegenden Hypothesen, eine Erhöhung der LF/HF-Ratio gewesen. Da HF recht zuverlässig dem parasympathischen Nervensystem zuzuordnen ist, LF sowohl sympathisch als auch parasympathisch-vermittelte Regulationen abbildet, erhöht sich die LF/HF-Ratio, je aktiver das sympathische Nervensystem ist. Eine entsprechende Erhöhung konnte in dieser Arbeit jedoch nicht als Unterschied zwischen Gruppe A und Gruppe B nachgewiesen werden.

Bei Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS kommt es zu einer Dysbalance des Gleichgewichtes von sympathischer und parasympathischer Aktivität des autonomen Systems. Die Diskriminierung von an einer PTBS erkrankten und gesunden Soldaten durch die HRV, signifikant zumindest für einen Parameter, stellt somit ein hypothesenbestätigendes Ergebnis dar. Dabei ergeben sich besonders für den Parameter SDNN erste Hinweise auf einen potentiellen diagnostischen Wert im Sinne eines Screeningparameters. So konnte auf dieser Basis gezeigt werden, dass der Einfluss des Parameters SDNN sich für eine Vorhersage der Gruppenzugehörigkeit als signifikant erweist. Für diesen konnte eine korrekte Klassifikationsrate von 73,8 % ermittelt werden.

### **Korrelation von Herzfrequenzvariabilität und der Symptomlast einsatzerfahrener Soldaten**

Unter klinischen Gesichtspunkten ebenso interessant scheint der ermittelte Zusammenhang von HRV und der Schwere der Symptomlast von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe A) und einsatzerfahrenen Soldaten ohne PTBS (Gruppe B). Es konnte gezeigt werden, dass vorrangig SDNN, ebenfalls auch RMSSD, mit der Schwere der Symptomlast korrelieren. Diese wurde in Form der Fragebögen scores BSI-GSI und PDS-gesamt ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass SDNN signifikant fällt, wenn die Symptomlast, sowohl dargestellt durch den BSI-GSI als auch PDS, in den Gruppen A und B steigt. Ebenso fällt RMSSD signifikant, wenn der BSI-GSI in den Gruppen A und B steigt. Die LF/HF-Ratio scheint diesbezüglich weniger aussagekräftig. In Zusammenschau kann somit festgehalten werden, dass eine höhere Symptomlast mit einer eingeschränkten HRV (SDNN und z. T. RMSSD) korreliert.

An dieser Stelle liegt eine erneute Interpretation erniedrigter SDNN-Werte im Sinne einer herabgesetzten Gesamtvariabilität nahe. Diese Annahme unterstützend deutet eine gleichzeitige Verminderung von RMSSD wiederum auf eine Verschiebung der Balance des autonomen Nervensystems in Richtung einer überwiegenden sympathischen Aktivität hin. Die parasympathische Aktivität wird bei dieser Annahme durch RMSSD als Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen sukzessiver NN-Intervalle dargestellt. Jedoch konnte in dieser Arbeit eine statistisch signifikante Abnahme von RMSSD nur bei steigender Symptomlast, gemessen durch BSI-GSI, festgestellt werden. Für den HRV-Parameter LF/HF-Ratio, als Ausdruck des vegetativen Gleichgewichtes, wäre eine positive Korrelation mit der Schwere der Symptomlast zu erwarten gewesen. Da insbesondere das Hochfrequenzband (HF) mit dem Parasympathikus, das Niedrigfrequenzband (LF) u. a. mit dem Sympathikus assoziiert werden, entsprächen erhöhte Werte der LF/HF-Ratio an dieser Stelle am ehesten einer verminderten parasympathischen Aktivität. Für diesen HRV-Parameter konnte in dieser Arbeit jedoch keine signifikante Korrelation mit der Schwere der Symptomlast in

den Gruppen A und B festgestellt werden. In Zusammenschau mit den vorherigen Ergebnissen scheinen die hier festgestellten Korrelationen besonders von SDNN, in zweiter Linie auch RMSSD, die Annahme einer Verschiebung des vegetativen Gleichgewichtes in Richtung einer überwiegenden Aktivität des sympathischen Nervensystems zu stützen und sich weiterhin zu einer Quantifizierung der Symptomlast nutzen zu lassen.

Dadurch kann einerseits der Hinweis auf eine potentielle Nutzung der HRV, insbesondere des Parameters SDNN, als Screeningparameter einer einsatzbedingten PTBS gefestigt und weiterhin vermutet werden, dass die HRV auch zur objektivierbaren Einschätzung des Schweregrades der Symptomlast nutzbar sein könnte. Ob diese Tendenz auch für einen longitudinalen Verlauf (z. B. im Rahmen einer Therapie) von Bestand ist, wird im Rahmen dieser Arbeit zu einem späteren Punkt betrachtet.

#### **4.1.2 Herzfrequenzvariabilität zur Differenzierung unterschiedlicher psychischer Belastungs- und Anspannungsniveaus von einsatzunerfahrenen Soldaten**

##### **Gruppenunterschiede der Herzfrequenzvariabilität bei einsatzunerfahrenen Soldaten**

In weiterführender Auswertung wurden nun nicht nur erkrankte oder gesunde einsatzerfahrene Soldaten betrachtet. Durch die Untersuchung von nicht einsatzerfahrenen Soldaten mit moderater chronischer Stressbelastung im Dienst sowie solchen mit höherer chronischer Stressbelastung sollte der Frage nachgegangen werden, ob Parameter der HRV auch zwischen Gruppen mit unterschiedlichen Anspannungsniveaus diskriminieren. Es zeigten sich in der vorliegenden Studie für die drei untersuchten HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio Unterschiede zwischen den Gruppen von Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit höherer chronischer Stressbelastung (Gruppe C) und Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit moderater chronischer Stressbelastung (Gruppe D). In Gruppe C stellten sich SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio erniedrigt gegenüber den Mittelwerten in Gruppe D dar. Erneut konnte dies im Sinne einer statistischen Signifikanz allein für den HRV-Parameter SDNN nachgewiesen werden. Eine Reduzierung der HRV, dargestellt durch den signifikanten Unterschied beim HRV-Parameter SDNN, entspräche auch an dieser Stelle einer eingeschränkten Gesamtvariabilität. In Zusammenschau mit einer, zwar nicht signifikanten jedoch zumindest tendentiellen, Erniedrigung auch von RMSSD lässt sich vermuten, dass auch unabhängig von Einsatzerfahrung und Vorliegen einer einsatzbedingten PTBS die HRV zur Differenzierung von Anspannungsniveaus herangezogen werden kann. Eine erklärende Zunahme sympathischer Aktivität und/oder eine Abnahme parasympathischer Aktivität im Gleichgewicht des autonomen Nervensystems kann auch bei einsatzunerfahrenen Soldaten erwartet werden.

Unabhängig von manifesten Erkrankungen kommt es auch im Rahmen chronischer Stressbelastung wie hohen beruflichen Beanspruchungen (so abgebildet durch z. B. im Rettungsdienst tätige Soldaten der Gruppe C) zu Veränderungen auch des Noradrenalin-System als Teil des autonomen Nervensystems [28]. Sind hierbei kurzfristige Auswirkungen auf den Organismus am ehesten als adaptive Reaktion auf den jeweiligen Stressor zu werten, folgt im Rahmen einer prolongierten, chronischen Stressexposition eine dauerhafte Inbalance autonomer Regulationssysteme. Diesen Erklärungsansatz bestätigend sollte in der vorliegenden Untersuchung auch eine Veränderung der LF/HF-Ratio erwartet werden. Anders als bei SDNN und RMSSD würde sich diese bei Verschiebung des vegetativen Gleichgewichtes in Richtung einer überwiegenden sympathischen Aktivität gegenüber dem parasympathischen Anteil erhöhen. Ein entsprechender Nachweis konnte hier nicht erfolgen. Auch die LF/HF-Ratio stellte sich im Mittel in der Gruppe mit höherer Stressbelastung (Gruppe C) gegenüber Gruppe D erniedrigt dar, dies allerdings nicht im Sinne einer statistischen Signifikanz. Für SDNN konnte über den signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen C und D hinaus wiederum ein signifikanter Einfluss auf die Gruppenzugehörigkeit ermittelt werden. Ausgehend von SDNN konnte für die Einteilung in die Gruppen C und D eine korrekte Klassifikationsrate von 66 % ermittelt werden.

Es lässt sich somit weiterhin der Hinweis ableiten, dass sich die HRV, insbesondere der Parameter SDNN, sowohl zur Unterscheidung von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS und einsatzerfahrenen Soldaten ohne Erkrankung als auch zur Unterscheidung von einsatzunerfahrenen Soldaten mit höherer und moderater chronischer Stressbelastung dienen könnte. Damit wäre die HRV nicht nur als Marker für Stress im Sinne von Symptomstress bei PTBS, wie oben beschrieben, sondern auch für allgemeinen, krankheitsunabhängigen Stress und Belastungen bei Soldaten nutzbar. Es kann vermutet werden, dass die Diskriminierung zwischen Soldaten mit und ohne Vorliegen einer einsatzbedingten PTBS sowie zwischen Soldaten mit höherer und moderater chronischer Stressbelastung durch die HRV nicht zwangsläufig auf einem spezifischen Pathomechanismus der PTBS fußt, sondern vielmehr als gemeinsamer Nenner die bereits beschriebene Dysbalance des autonomen Nervensystems zu Grunde liegt. Eine Verschiebung des vegetativen Gleichgewichts hin zu einer verstärkten Sympathikus- und einer verminderten Parasympathikusaktivität ist somit zwar durchaus als Teil der Pathogenese im Rahmen einer PTBS zu sehen, jedoch für diese nicht spezifisch.

### **Korrelation von Herzfrequenzvariabilität und der psychischen Belastung von einsatzunerfahrenen Soldaten mit unterschiedlicher Stressbelastung**

In dieser Arbeit konnte, wie im Ergebnisteil dargestellt, auch eine Korrelation des HRV-Parameters HF/LF-Ratio mit der Symptomlast, gemessen im PDS, für einsatzunerfahrene Soldaten (Gruppe C und D) aufgezeigt werden, jedoch sollte dieser Zusammenhang nicht

überbewertet werden. Konkret zeigte sich, dass die LF/HF-Ratio steigt, wenn PDS-gesamt in den Gruppen C und D steigt. Somit liegt eine statistisch signifikante positive Korrelation vor. Den vorangehenden Überlegungen folgend wäre auch an dieser Stelle eine Verschiebung des vegetativen Gleichgewichts in Richtung einer überwiegenden sympathischen Aktivität des autonomen Nervensystems mit steigender Symptomlast möglich und eine steigende LF/HF-Ratio als dessen Ausdruck zu interpretieren. Jedoch handelt es sich beim PDS um einen Selbstauskunftsfragebogen, in welchem traumatische Erlebnisse und Symptome der PTBS abgefragt werden. Sowohl bei Gruppe C als auch bei Gruppe D handelt es sich gemäß Studiendesign allerdings um nicht einsatzerfahrene Gruppen, bei denen eben keine PTBS vorliegt. Somit erscheint die Aussagekraft des PDS an dieser Stelle eher eingeschränkt. Weiterhin widerspricht die positive Korrelation, wenn auch den Hypothesen entsprechend, dem Ergebnis, dass die LF/HF-Ratio in der höher belasteten Gruppe C einen (allerdings nicht signifikant) niedrigeren Wert als in der weniger belasteten Gruppe D zeigt. Natürlich können etwaige psychische Belastungen auch subklinisch, ohne Vorliegen einer manifesten psychiatrischen Diagnose, zum Ausdruck kommen. Dann wäre jedoch am ehesten eine Korrelation der HRV mit den Werten des BSI-GSI zu erwarten gewesen, welche deutlich breiter gefächert sowohl Symptome der PTBS zugehörigen Komorbiditäten als auch anteilig unspezifische Symptome eines allgemein erhöhten Anspannungsniveaus abgedeckt hätten. Eine Korrelation zwischen der (Symptom-)Belastung im BSI-GSI und der HRV konnte jedoch für keinen der erhobenen Parameter eruiert werden. Dieser Aspekt wird aus den beschriebenen Gründen folgend nicht weiter betrachtet.

### **4.1.3 Beurteilung im Literaturkontext**

Zusammenfassend wiesen die erhobenen HRV-Parameter, besonders jedoch der Parameter SDNN, gute und stabile Korrelationen mit der Gruppenzugehörigkeit auf. Die höher belasteten Probandengruppen wiesen jeweils signifikant niedrigere SDNN-Werte auf als die weniger belasteten Gruppen. Insbesondere die Gruppe der an einer einsatzbedingten PTBS erkrankten Soldaten zeigte die im Gruppenvergleich niedrigsten Werte und damit eine verminderte Fähigkeit des Organismus, adäquat auf Stressbelastung zu reagieren [55]. Auch beim Vergleich innerhalb der Gruppen von Soldaten mit Auslandseinsatz zeigten sich insbesondere bei SDNN signifikante Unterschiede, welche einen ersten Rückschluss nahelegen, SDNN zur Differenzierung gesunder und kranker Probanden heranzuziehen. Zum Teil betätigen die Ergebnisse bereits erfolgte Studien [27]. Die Studienlage stellt sich an dieser Stelle jedoch wenig einheitlich dar. Sowohl finden sich unterschiedlichste Parameter der HRV als auch äußert unterschiedliches Probandenklientel. Hauschildt et al. 2011 konnten bei zivilen Probanden mit einer diagnostizierten PTBS nach interpersoneller Gewalterfahrung für RMSSD eine signifikante Reduktion eruiieren [82]. Lee et Theus 2012 und Tan et al. 2013 konnten diesen bei

weiblichen Veteranen mit einer diagnostizierten PTBS nach sexuellem Missbrauch, interpersoneller Gewalt oder militärischen Kampferlebnissen für SDNN zeigen [104, 105]. Chang et al. 2013 konnten eine signifikante Erniedrigung für LF und HF bei Zivilisten mit traumatischen Erlebnissen zeigen [80], Cohen et al. 2000 eine Erhöhung für die LF/HF-Ratio, ohne ein bestimmtes Probandenklientel herangezogen zu haben [81], Mitani et al. 2006 eine Erhöhung der LF/HF-Ratio bei traumatisierten Feuerwehrbediensteten [106], Tucker et al. 2012 ebenfalls eine Erhöhung der LF/HF-Ratio bei Überlebenden des Hurrikans Katrina [88]. Shaik al arab et al. 2012 zeigten eine Reduktion gleich mehrerer HRV-Parameter, hierunter auch SDNN und RMSSD, für Verkehrsunfallgeschädigte [85]. In weiteren Studien wurden entweder nicht mit dieser Arbeit deckungsgleiche HRV-Parameter betrachtet oder diese zeigten nur eine tendenzielle, aber keine signifikante Veränderung. Sowohl unterscheiden sich die betrachteten Probandenklientel von jenen in der vorliegenden Arbeit, welche eine ausschließlich militärische Personenpopulation mit diagnostizierter PTBS nach Kampferfahrungen im Auslandseinsatz betrachtete, als auch, dass sich in der überwiegenden Anzahl der stattgehabten Studien methodische Leerstellen finden. Exemplarisch finden sich bei Moon et al. 2013 sowie Tan et al. 2013 keine Ausschlusskriterien für Probanden, bei anderen genannten Studien eher unvollständige. So wurden bei keiner Studie internistische Erkrankungen wie Diabetes mellitus oder ein arterieller Hypertonus berücksichtigt. Auch die Dauer der Messung schränkt die Aussagekraft einiger Studien ein. Während bei Shaikh al arab et al. 2012 eine 24h-Messung erfolgte ist bei Moon et al. 2013 die Aussagekraft der Ergebnisse bei einem mit 10 Sekunden sehr kurzen Messintervall als eher gering einzuschätzen [35]. Dennoch lässt sich summarisch festhalten, dass in einem Großteil der stattgehabten Studien, welche den Zusammenhang von HRV und PTBS untersuchten, ein signifikanter Einfluss gefunden werden konnte. [27] Somit können Teilergebnisse dieser Arbeit bei aller Divergenz der Methodik in einen bestätigenden Kontext eingeordnet werden.

Innerhalb der Gruppe von Soldaten mit Auslandseinsatz konnte weiterhin eine signifikante Korrelation von SDNN, in zweiter Linie RMSSD, mit der Symptomlast nachgewiesen werden. SDNN, in zweiter Linie RMSSD, fiel signifikant, wenn die Symptomlast stieg. Der Parameter LF/HF-Ratio schien diesbezüglich wenig aussagekräftig. Es ergibt sich dadurch ein erster Hinweis auf die mögliche Nutzung der HRV zur objektivierbaren Einschätzung des Schweregrades der PTBS. In Zusammenschau dieser Ergebnisse scheint eine Verwendung der SDNN als Screeningparameter einer einsatzbedingten PTBS nahezuliegen. Eine Korrelation von HRV und Symptomlast der PTBS wurde u. a. bei Song et al. 2011 für die *Minnesota Multiphasic Personality Inventory-PTSD scale* und LF/HF-Ratio bei nordkoreanischen Deserteuren [86] sowie bei Green et al. 2016 für Parameter des *Ecological Momentary Assessment* und LF sowie HF [107] festgestellt. Auch Liddell et al. 2016 sowie Dennis et al. 2014 zeigten bereits Zusammenhänge der HRV zur Schwere der Symptomlast der PTBS, auch bezüglich SDNN und RMSSD [108, 109]. Durch D'Souza et al. 2018 konnte keine Korrela-

tion zwischen der Schwere einer PTBS und der HRV nachgewiesen werden [110]. Insgesamt erscheint die Studienlage hier noch wenig aussagekräftig, eine Einordnung der eigenen Ergebnisse in einen bestätigenden Kontext ist jedoch mit Einschränkungen möglich.

Auch bei einsatzunerfahrenen Soldaten, im Rahmen dieser Arbeit also ohne PTBS, wiesen die höher belasteten Probandengruppen jeweils signifikant niedrigere SDNN-Werte auf als die weniger belasteten Gruppen. Für RMSSD gilt dies ebenfalls, jedoch lediglich tendenziell und nicht statistisch signifikant. Diese Ergebnisse können in ein breites Spektrum bereits stattgehabter, wenn auch äußerst unterschiedlicher Studien hinsichtlich Fragestellung, Methodik und Probandenklientel, eingeordnet werden [69–76]. Diesbezüglich konnte sich die HRV bereits als Indikator für psychische Beanspruchung und zur Beurteilung der Adaptions- und Anpassungsfähigkeit des Organismus abseits manifester somatischer oder psychischer Erkrankungen etablieren [35]. In anderen Studien wurde diese Eignung ebenfalls für militärisches Personal untersucht [77–79]. Die eigenen Ergebnisse können also auch hinsichtlich der Diskriminierungsfähigkeit der HRV bezüglich unterschiedlicher Stressniveaus in einen bestätigenden Gesamtkontext eingeordnet werden.

## **4.2 Herzfrequenzvariabilität im zeitlichen Verlauf bei Soldaten mit einsatzbedingter posttraumatischer Belastungsstörung mit und ohne Therapie**

Ziel des längsschnittlichen Teils der Untersuchung war es nunmehr, die untersuchten HRV-Parameter hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung als Therapieverlaufparameter zu beurteilen. Hierzu wurde untersucht, ob sich die HRV-Parameter bei Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS unter der Durchführung einer stationären Traumatherapie signifikant verändern und diese Veränderung mit einer Veränderung der psychometrisch gemessenen Symptomlast korreliert. Im Vergleich hierzu wurde eine weitere Probandengruppe von Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS untersucht, welche statt einer stationären Traumatherapie einem adäquaten Zeitintervall einer Warteliste zugeführt wurde.

### **4.2.1 Entwicklung der Symptomlast während Therapie und Warteintervall**

Im vorangegangenen Ergebnisteil dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass für die Gruppe von Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS (Gruppe A) eine Abnahme der Symptomlast, gemessen durch BSI-GSI sowie PDS, in einem statistisch signifikantem Umfang zu

verzeichnen war. Dieses Ergebnis ließ sich jedoch nicht in signifikantem Maßstab für die Untergruppen As und Aw, also jenen Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Psychotherapie oder in einem adäquaten Warteintervall befindlich, reproduzieren. Für diese konnte somit lediglich eine tendenzielle, wenn auch gleichgerichtete, Abnahme der Symptomlast verzeichnet werden.

Hinsichtlich der Symptomlast im BSI stellt sich die registrierte Abnahme vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt in der Gruppe As als tendenziell größer dar als jene in der Gruppe Aw. Diese Entwicklung erscheint plausibel und erwartbar. So erhielten jene Probanden der Gruppe As schließlich ein stationäres Therapiesetting. Dieses bildete durch Maßnahmen wie Ergotherapie, Entspannungs-, Bewegungs-, Aroma- und Akupunkturtherapie neben im Verlauf traumakonfrontativen vor allem stabilisierende Elemente ab, welche in der gewünschten Konsequenz eine Reduktion des Anspannungsniveaus nahelegen. Weiterhin zielte dieses Behandlungskonzept auf eine Reduktion aller psychiatrischer Symptome ab. So sollte durch die Anwendung und Vermittlung verhaltenstherapeutischer Komponenten eine Reduktion von Angstsymptomatik bewirkt werden. An dieser Stelle bildet der BSI-GSI mit seinen neun Symptomdimensionen auch hinsichtlich komorbider Störungen der PTBS am ehesten das Spektrum an Symptomen ab, welchem in einem dreiwöchigen Zeitraum der stationären Therapie begegnet werden konnte. Die Symptomlast im PDS hingegen verminderte sich vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt tendenziell in der Gruppe Aw stärker als in der Gruppe As. Dies scheint zunächst überraschend, sollte doch als Ergebnis einer Behandlung, im Gegensatz zu reiner Wartezeit, eine stärkere Reduktion der Symptomlast zu erwarten sein. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte in der Art des Fragebogens sowie therapiespezifischer Umstände liegen. Neben zuvor genannten stabilisierenden Elementen erfolgte in der multimodalen stationären Therapie auch eine traumaspezifische Therapie mittels EMDR. Die EMDR-Therapie gehört zu den traumakonfrontativen Verfahren, d. h. in Therapie befindliche Soldaten waren vermehrt ihren ursprünglich traumatisierenden Erlebnissen ausgesetzt. Dies könnte zu Beginn einer traumakonfrontativen Therapie sogar eine Steigerung der PTBS-Symptomatik bewirken, weshalb sich eine Verknüpfung mit stabilisierenden Elementen als unabdingbar darstellt. Da der PDS sich nun im Gegensatz zum BSI ausschließlich auf traumaspezifische Symptome beschränkt, kann somit zumindest eine geringere Abnahme der Symptomlast im PDS in der Gruppe As hergeleitet werden.

Ein ebenfalls interessanter Unterschied zwischen den Gruppe As und Aw zeigt sich bereits zum ersten Messzeitpunkt. Die Gruppe von Soldaten in stationärer Behandlung zeigt höhere Belastungswerte sowohl in BSI-GSI als auch PDS-gesamt. Dies wäre so nicht zu erwarten gewesen, da gemäß Studiendesign eine Zuteilung zu den beiden Untergruppen zufällig erfolgte. Es kann vermutet werden, dass bereits die Ankündigung einer stationären Therapie im Sinne eines Stressors bei betroffenen Probanden zu einer Zunahme der Symptomlast führte.

## 4.2.2 Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität während Therapie und Warteintervall

Analog zu einer Betrachtung der Symptomlast zwischen erstem und zweiten Messzeitpunkt, wie obig dargestellt, wurde auch die Entwicklung der HRV zwischen beiden Messzeitpunkten betrachtet. Hierbei konnte im Gegensatz zur Symptomlast ein Unterschied zwischen der Gruppe von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS in stationärer Psychotherapie (Gruppe As) und jenen mit einsatzbedingter PTBS ohne Therapie in einem adäquaten Zeitintervall auf einer Warteliste (Gruppe Aw) gefunden werden.

Für die HRV-Parameter SDNN und RMSSD zeigte sich jeweils eine statistisch signifikante Zunahme beider Parameter vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt, allerdings ausschließlich in Gruppe As. Eine Zunahme beider HRV-Parameter unter laufender Psychotherapie lässt an dieser Stelle vermuten, dass diese als Ausdruck stattgehabter Veränderungen der vegetativen Balance zu werten ist. Somit würde das zuvor herrschende Ungleichgewicht zu Gunsten einer überwiegenden sympathischen Aktivität aufgrund erhöhter Stress- und Anspannungszustände durch eine stationäre Psychotherapie vermehrt in Richtung einer verstärkten parasympathischen Aktivität rückverschoben. Diesen Deutungsansatz bestärkend zeigte sich selbige Entwicklung in der Gruppe Aw nicht. Dieser Umstand legt nochmals nahe, dass die signifikante Zunahme von SDNN und RMSSD auf Umstände der Therapie zurückgeführt werden kann. Die Gruppe von Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne Therapie verblieb mit annähernd gleichbleibenden Werten für beide HRV-Parameter auf gleichem Stand (im Sinne eines vegetativen Ungleichgewichtes wie zum ersten Messzeitpunkt). Durch eine signifikante Veränderung in Gruppe As und nahezu gleichbleibenden Werten in der Gruppe Aw war somit der Unterschied zwischen den Gruppen selbst statistisch signifikant. Für die LF/HF-Ratio konnte eine nicht signifikante, jedoch tendentielle Abnahme, dieses Mal allerdings in der Gruppe Aw, festgestellt werden. Die LF/HF-Ratio scheint an dieser Stelle also zumindest auf eine tendentielle Abnahme der sympathischen Überaktivität auch ohne stattgehabte Therapie hinzuweisen, ist unter dem Gesichtspunkt fehlender Signifikanzen jedoch deutlich vorsichtiger in seiner Bedeutung heranzuziehen.

Im Querschnittsteil wurde nun bereits festgestellt, dass für beide HRV-Parameter, SDNN und RMSSD, niedrige Werte mit höheren Belastungen assoziiert sind. Im Längsschnittteil stiegen beide Werte in Gruppe As, also der Gruppe von Soldaten in der stationären Therapie, vom ersten zum zweiten Messzeitpunkt stark an, während sie in Gruppe Aw, der Gruppe von Soldaten, welche an einer PTBS erkrankt sind, sich aber auf der Therapiewarteliste befinden, nahezu konstant blieben. Das könnte den Rückschluss nahelegen, dass sich eine geminderte Symptomlast, erhoben mittels BSI und PDS in einer Zunahme der HRV widerspiegelt. Hierdurch ergeben sich erste Hinweise, dass die HRV, speziell die Parameter SDNN und RMSSD, sich nicht nur zur Objektivierung der Stressbelastung, im Übertrag zur Quantifizierung der

Symptomschwere bei PTBS-Erkrankten, sondern auch im Laufe einer Therapie als Verlaufs- und Therapiekontrollparameter nutzen lässt.

### **4.2.3 Entwicklung der Herzfrequenzvariabilität nach stattgehabter Therapie**

Wie bereits im Ergebnisteil dargestellt erfolgte eine weitere Messung ca. drei Monate nach Therapie für 15 Probanden der Gruppe As. Vorgehend konnte gezeigt werden, dass die HRV-Parameter SDNN und RMSSD für diese Probandengruppe (Soldaten mit einsatzbedingter PTBS mit stationärer Psychotherapie) während der Therapie signifikant zunahmen. Dies wurde in Zusammenhang mit einem potentiellen Einfluss der therapeutischen Maßnahmen auf die vegetative Balance der Probanden in Verbindung gebracht. Es wurde vermutet, dass sich der Einfluss der durchgeführten Therapie in einer Verminderung der sympathischen Überaktivität oder einer Verstärkung der zuvor verminderten parasympathischen Aktivität zeigt. Nun konnte bei der Messung drei Monate nach Therapie festgestellt werden, dass die zuvor verzeichnete Zunahme von SDNN und RMSSD zum zweiten Messzeitpunkt einer nahezu identischen Abnahme zum dritten Messzeitpunkt entsprach, sodass sich beide Parameter auf einem Niveau wie vor der Therapie wiederfanden. Diese Ergebnisse sind zwar aufgrund der nochmals eingeschränkten Probandenzahl eher zurückhaltend zu interpretieren. Dennoch lässt sich ein durchaus interessanter Eindruck gewinnen, dass Teilerfolge einer stationären Psychotherapie bereits drei Monate später nicht mehr vorhanden waren. Es kann vermutet werden, dass dieser Effekt mit einer zunehmenden Konfrontation mit Alltagssituationen einhergeht. Befanden sich die Probanden während der Therapie, wenn auch z. T. mit traumakonfrontativen Anteilen, in einem stabilisierendem und eher reizarmen Umfeld, so finden sie sich nach der Therapie in der Regel umso mehr potentiellen Triggersituationen ausgesetzt. Insbesondere komorbide Angststörungen könnten hier zum Tragen kommen. Dennoch bleibt die Verwertbarkeit dieser Vermutung deutlich eingeschränkt. Hier muss nicht nur die geringe Probandenzahl sondern auch ein fehlender Vergleich zwischen den Gruppen sowie fehlende Informationen über die therapeutische Anbindung nach Therapie, Lebensumstände und potentielle Komorbiditäten sowie der Einsatz von Medikation auf die HRV genannt werden.

### **4.2.4 Beurteilung im Literaturkontext**

Zusammenfassend konnte für Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS eine Zunahme der HRV, hier der Parameter SDNN und RMSSD, nach der Durchführung einer stationären Psychotherapie gezeigt werden. In der Gruppe ohne Therapie verblieben beide Parameter

annähernd auf Ausgangsniveau, also wie vor Therapie. Eine Abnahme und somit Verbesserung der Symptomlast konnte ebenfalls verzeichnet werden, allerdings im Sinne einer statistischen Signifikanz nur in der Gesamtgruppe von Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS, in Therapie- und Wartelistengruppe ließ sich die besagte Abnahme nur tendentiell beobachten. Ein valider Unterschied zwischen den beiden Gruppen konnte somit nicht festgestellt werden. Im Übertrag konnte auch keine Korrelation der Änderung der Symptomlast und der Änderung der HRV im Verlauf der Therapie bzw. eines adäquaten Warteintervalles ohne Therapie herausgearbeitet werden.

Für eine Betrachtung von HRV-Parametern unter dem Gesichtspunkt des Therapieverlaufes bei vorliegender PTBS konnte zum jetzigen Zeitpunkt eine doch eher spärliche Studienlage identifiziert werden. Der Parameter LF/HF-Ratio, welcher in der vorliegenden Arbeit nur auf eine sehr eingeschränkte Verwendbarkeit im Therapieverlauf schließen ließ, wurde u. a. bei drei in den Rahmenbedingungen recht unterschiedlichen Studien betrachtet [106, 111, 112]. Cohen et al. 2000 betrachteten die HRV dabei unter pharmazeutischer Therapie mit einem SSRI, Nishit et al. 2003 unter Anwendung kognitiver Verhaltenstherapie bei weiblichen Opfern von Vergewaltigungen, Mitani et al. 2006 hinsichtlich des Einflusses von autogenem Training bei Feuerwehrbediensteten. Der Parameter zeigte bei den drei benannten Studien eine Verringerung als zu vermutendes Ergebnis stattgehabter Therapie [83]. Sowohl die benannten Behandlungsmethoden als auch das Probandenklientel stellen sich zur vorliegenden Arbeit als äußerst divergent dar. Die eigenen bereits beschriebenen Ergebnisse können die Studienlage an dieser Stelle nicht valide stützen, zumal zwar eine Verringerung des HRV-Parameters LF/HF-Ratio im zeitlichen Verlauf festgehalten werden konnte, allerdings in der Gruppe von Probanden, welche keine Therapie erhielt. Der Einfluss einer SSRI-Therapie auf die HRV [90, 111] wird im Kapitel Limitationen erneut aufgegriffen werden. Für den Parameter RMSSD wurden in der Studienlage mit Einschränkungen die eigenen Ergebnisse bestätigende Erkenntnisse identifiziert. In zwei Studien wurde die HRV auch mittels RMSSD im Verlaufe der Therapie von traumatisierten Patienten betrachtet [113, 114]. Interessanterweise erfolgte in beiden Studien die Therapie mittels EMDR. Zumindest hinsichtlich des Therapieverfahrens findet sich somit eine annähernde Vergleichbarkeit zur eigenen Untersuchung. Frustaci et al. 2010 untersuchten dabei Probanden mit mindestens einem traumatisierendem Ereignis vor einem Warteintervall, welches vor einer 45-minütigen Therapiesitzung mittels EMDR verortet war, und danach. Es findet sich also keineswegs eine Betrachtung über einen längeren Therapieverlauf. In jener Studie konnte jedoch ebenfalls eine Erhöhung des Parameters RMSSD verzeichnet werden. Sack et al. 2008 beschäftigten sich auch mit der Entwicklung von RMSSD innerhalb einer Therapiesitzung und nicht über einen längeren Therapiezeitraum. Hierbei konnten auch für RMSSD signifikante Unterschiede innerhalb einer Therapiesitzung festgestellt werden, wobei jeweils am Ende eine Zunahme von RMSSD und somit einer Verschiebung des vegetativen Gleichgewichtes in Richtung einer

Aktivitätszunahme des Parasympathikus und/oder einer Aktivitätsabnahme des Sympathikus, verzeichnet wurde. An dieser Stelle muss vielmehr die Aussagekraft der in der eigenen Arbeit durchgeführten fünfminütigen Messung kritisch betrachtet werden. Für den Parameter SDNN konnten bereits Zucker et al. 2009 für Probanden mit PTBS-Symptomatik eine Zunahme im Therapieverlauf zeigen [115]. Die Therapie erfolgte hierbei mittels *respiratory sinus arrhythmia*-Biofeedback im Vergleich zu progressiver Muskelrelaxation. Obgleich unterschiedlicher Therapiemethoden stützen die Erkenntnisse dieser Arbeit jene Studienergebnisse. Weitere Studien nutzten die HRV im Rahmen von Biofeedback-Methoden für die Therapie, betrachteten ihre Parameter hingegen nicht als potentiellen Therapieverlaufsparameter [87, 116]. Tan et al. 2011 konnten hierbei in ihrer Untersuchung sowohl, entsprechend den eigenen Ergebnissen, eine Verminderung des HRV-Parameters SDNN bei Veteranen mit einer PTBS zu nicht erkrankten Veteranen aufzeigen, als auch eine signifikante Reduktion von PTBS-Symptomen unter HRV-Biofeedback-Therapie.

Auch wenn die bisherige Studienlage aufgrund verschiedener Settings, unterschiedlicher Probandenklientels und der Nutzung der HRV als Teil der Therapie (Biofeedback-Methoden) nur sehr eingeschränkt vergleichbar erscheint, können die eigenen Ergebnisse in einen insgesamt bestätigenden Kontext eingeordnet werden. Es ergeben sich in Zusammenschau erste Hinweise, dass besonders die Parameter SDNN und RMSSD als Verlaufs- und Therapiekontrollparameter nutzbar sein könnten. Die Aussagekraft wird jedoch durch fehlende Korrelation der durch psychometrische Testungen gemessenen Belastungsänderung im Laufe der Therapie und der Änderung der HRV eingeschränkt.

### 4.3 Limitationen

Zu den Stärken der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Studie gehören aus Sicht des Autors die bereits beschriebene Berücksichtigung bekannter Confounder [68], insbesondere bei der Anwendung von Ausschlusskriterien, sowie die Berücksichtigung von Alter und Anzahl der Einsatztage der Probanden bei der statistischen Auswertung. Es wurden bereits bei den Ausschlusskriterien für Probanden Erkrankungen berücksichtigt, welche die HRV beeinflussen können. Dies ist sowohl bei psychischen Erkrankungen, wie der Schizophrenie, Bipolarität, Major Depression [32] sowie Angst- und Panikstörungen [33, 34] der Fall, als auch bei diversen körperlichen Erkrankungen, wie Herz-Kreislaufkrankungen, Diabetes mellitus [35], Schilddrüsenerkrankungen [36, 37], neurodegenerativen Erkrankungen und chronischen Nierenerkrankungen [38]. Weiterhin wurden, soweit möglich, jene Probanden ausgeschlossen, welche Medikamente einnahmen, die die HRV beeinflussen können, insbesondere Antihypertensiva [39, 66, 67]. Allerdings kann auch die Einnahme verschiedener Antidepressiva,

insbesondere trizyklischer Antidepressiva, aber auch SSRIs und SNRIs, die HRV beeinflussen [39, 90, 117]. Zwar nahm in der vorliegenden Studie nur ein relativ kleiner Anteil der Probanden überhaupt Medikation ein (16,3 %). Jedoch wurde hierbei lediglich die Einnahme vermerkt. Zeitliche Aspekte wie Medikationsbeginn und -dauer oder qualitative wie die Medikationsintensität erfuhren keine Berücksichtigung, sodass ein möglicher Einfluss auf die HRV an dieser Stelle nicht beurteilt werden kann. Ein Ausschluss dieser Probanden war aufgrund der ohnehin geringen Anzahl im Rahmen dieser Studie nicht möglich und nicht vorgesehen, sollte jedoch unbedingt in zukünftigen Untersuchungen Berücksichtigung finden.

Limitiert werden diese ersten Hinweise insbesondere durch das Design der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Studie. In deren Rahmen wurden gleich mehrere potentielle physiologische und psychometrische Marker auf Zusammenhänge mit einer PTBS untersucht und somit kein parameterspezifisches Studiendesign ermöglicht. Die ermittelten Ergebnisse sind somit als Hinweise und nicht als statistisch gesichert zu betrachten. Eine Überprüfung durch entsprechend designte Konfirmationsstudien erscheint jedoch bei den vorliegenden deutlichen und klinisch relevanten Hinweisen als angebracht. Für sämtliche statistischen Auswertungen muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass, wenn man eine Bonferroni-Korrektur durchführt und das Signifikanzniveau bei den Hauptauswertungen auf 0.002 absenkt, keine der ermittelten Signifikanzen bestehen bleibt. Das deutet darauf hin, dass es sinnvoll sein kann, die Untersuchung mit größeren Fallzahlen und gezielter HRV-Parameter-Auswahl zu wiederholen. Um die hier beobachteten Effektgrößen mit hinreichender Power absichern zu können, ist dabei anzuraten, zwei unterschiedlich belastete Gruppen mit mindestens 35 Probanden pro Gruppe zu untersuchen. Dabei sollten als Voraussetzungen die Beschränkung auf nur eine Hauptauswertung und der Verzicht auf eine Bonferroni-Korrektur gelten.

Weiterhin muss konstatiert werden, dass die Dokumentation im Rahmen der Probandenrekrutierung nicht vollumfänglich einem Anspruch Vollständigkeit, Objektivität und Transparenz (z. B. gemäß CONSORT-Statement) gerecht werden kann. So erfolgte u. a. keine Dokumentation der Gesamtzahl geeigneter Probanden. Diesem Umstand sollte in potentiellen Konfirmationsstudien entsprechend begegnet werden.

Das in dieser Untersuchung angewandte Messverfahren zur Ermittlung der HRV ist mit einem 5-minütigen Messintervall ebenfalls eher kritisch zu bewerten. Vorherige Untersuchungen zeigten bereits Hinweise darauf, dass Kurz- und Langzeitmessungen zur Ermittlung der HRV nur bedingt miteinander korrelieren und hierdurch Verzerrungseffekte ermöglicht werden [68].

Zusammenfassend sollte das Studiendesign in zukünftigen Untersuchungen eine getrennte Thesenüberprüfung an Probanden mit und ohne Psychopharmakaeinnahme sowie die Betrachtung einer größeren Probandengruppe ermöglichen. Dabei sollte eine Anpassung der

Gruppengröße an den zu messenden Parameter erfolgen. Für die Messung der HRV empfiehlt sich eine Langzeitmessung unter standardisierten Bedingungen wie einer vorherigen Aufklärung zu Verhaltensweisen und dem Konsum diverser Stimuli während der Messung. Insbesondere aber ist ein longitudinales Studiendesign mit Messungen auch vor und nach einem Auslandseinsatz in Erwägung zu ziehen.

## 4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Erkrankungsbild einer PTBS bei Soldaten ist durch die Intensivierung der Einsatzbelastung der Bundeswehr innerhalb der letzten Jahre zunehmend in den Fokus der Aufmerksamkeit insbesondere natürlich Betroffener, aber auch aller an der Behandlung und Betreuung betroffener Soldaten Beteiligter, der Politik sowie in Anteilen auch der Zivilbevölkerung gerückt. Es haben sich unterschiedliche Therapieformen und -konzepte, von stabilisierenden Therapieelementen bis traumakonfrontativen Verfahren wie die IRRT und EMDR, etabliert. Dennoch finden sich Unschärfen insbesondere zur Verquickung der psychischen Diagnose und Symptomatik zur Somatik und deren potentiellen Markern. Ziel dieser Studie war es somit, besonders solche Marker zu identifizieren, die sich perspektivisch zur Objektivierung von Diagnosestellung und Therapieverlauf einsetzen lassen. In dieser Arbeit wurde als Teil der zu Grunde liegenden Studie die HRV mit den drei spezifischen Parametern SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio untersucht. Erhoben wurden diese in fünf unterschiedlichen Gruppen von Probanden, zwei davon mit der Diagnose einer einsatzbedingten PTBS (Gruppe As und Aw), eine mit Einsatzerfahrung ohne Erkrankung (Gruppe B) sowie zwei ohne Einsatzerfahrung mit höherer und moderater chronischer Stressbelastung (Gruppe C und D). Betrachtet wurden Zusammenhänge mit der HRV in einem querschnittlichen Design für insgesamt 118 männliche Probanden und in einem längsschnittlichen Design für insgesamt 32 Soldaten mit einsatzbedingter PTBS unter Einfluss einer stationären Psychotherapie sowie ohne Therapie in einem adäquaten Zeitintervall. Ein Teil der stationär Behandelten wurde im Sinne einer Katamnese noch zu einem dritten Zeitpunkt untersucht. Es sollte die Eignung der HRV zur Diskriminierung zwischen an einer PTBS erkrankten und gesunden Soldaten, zwischen Soldaten mit unterschiedlicher Stressniveaus, zur Objektivierung der Symptomlast einer PTBS sowie als Therapieverlaufparameter beurteilt werden.

Orientierend an den in Kapitel 1.5 dieser Arbeit zu Grunde liegenden Hypothesen und den daraus abgeleiteten Fragestellungen konnte vorangehend gezeigt werden, dass sich der HRV-Parameter SDNN für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS (Gruppe A) signifikant von den Werten der Gesunden (Gruppe B) unterscheidet. Soldaten mit einsatzbedingter PTBS wiesen signifikant reduzierte SDNN-Werte zum ersten Messzeitpunkt auf. Somit scheint SDNN geeignet, zwischen Soldaten mit einer einsatzbedingten PTBS und gesunden einsatzerfahrenen

Soldaten zu diskriminieren. Für den HRV-Parameter RMSSD konnte eine hierzu gleichgerichtete Tendenz, jedoch nicht auf statistisch signifikantem Niveau festgehalten werden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich wiederum SDNN für Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung (Gruppe C) signifikant von den Werten jener mit moderater chronischer Stressbelastung (Gruppe D) unterscheidet. Soldaten mit höherer chronischer Stressbelastung wiesen signifikant reduzierte SDNN-Werte zum ersten Messzeitpunkt aus, womit SDNN auch geeignet erscheint zwischen Soldaten ohne Einsatzerfahrung mit höherer und moderater chronischer Stressbelastung zu diskriminieren. Erneut konnte für RMSSD lediglich eine statistisch nicht signifikante Reduzierung festgehalten werden.

Ebenfalls hypothesenbestätigend konnte für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS unter Durchführung einer stationären Psychotherapie (Gruppe As) eine stärkere Veränderung sowohl von SDNN als auch RMSSD gezeigt werden als für Soldaten in der Wartegruppe ohne Therapie (Gruppe Aw). Soldaten mit einsatzbedingter PTBS mit Therapie wiesen signifikant gesteigerte SDNN- und RMSSD-Werte zum zweiten Messzeitpunkt auf, während diese für Soldaten mit einsatzbedingter PTBS ohne Therapie annähernd auf dem Niveau des ersten Messzeitpunktes verblieben. Somit scheinen sowohl SDNN als auch RMSSD zur Beurteilung des Therapieverlaufs in Betracht zu kommen. Eine kontinuierliche Zunahme im Sinne einer Beständigkeit des Therapieerfolges auch zum dritten Messzeitpunkt konnte nicht gezeigt werden. Sowohl SDNN als auch RMSSD fielen bis zur katamnestischen Messung drei Monate nach durchgeführter Therapie wieder auf ihr Ausgangsniveau ab.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem HRV-Parameter SDNN, in zweiter Linie auch RMSSD (BSI-GSI), und der Symptomlast einsatzerfahrener Soldaten (Gruppe A und B) besteht. Eine höhere Symptomlast korrelierte hinsichtlich BSI-GSI und PDS signifikant negativ mit SDNN und hinsichtlich BSI-GSI mit RMSSD. Eine Korrelation von Änderung der HRV mit der Änderung der Symptomlast im Verlauf der Therapie konnte jedoch nicht gezeigt werden. Für einsatzunerfahrene Soldaten (Gruppe C und D) konnte lediglich eine signifikant positive Korrelation der Belastung im PDS mit dem HRV-Parameter LF/HF-Ratio festgehalten werden.

Diese Ergebnisse bestätigen die bereits in der Zusammenschau der bisherigen Studienlage vorliegenden Tendenzen. Es ergeben sich somit erste Hinweise, dass die HRV, besonders der Parameter SDNN, als objektiver Parameter sowohl für die Stressbelastung bei unterschiedlicher beruflicher Anspannung als auch für die Symptomlast bei PTBS-Erkrankten anwendbar sein könnte. Weiterhin lässt sich annehmen, dass sich die HRV-Parameter (besonders die Parameter SDNN und RMSSD) auch als Verlaufs- und Therapiekontrollparameter nutzen lassen könnten. Die Aussagekraft dieser Ergebnisse muss jedoch gemäß obig angeführten Limitationen eingeschränkt werden. Die Ergebnisse können so nur als Hinweise und somit als Grundlage für folgende Konfirmationsstudien angesehen werden.

Die Integration der HRV als potentielles Diagnostikum und als Parameter der Verlaufsbeurteilung wäre zweifelsfrei von großem Nutzen. Insbesondere in einer Personenpopulation, welche im Zuge von Auslandseinsätzen in zunehmendem Maße mit traumatisierenden Ereignissen konfrontiert wird und einem hohen Anspannungsniveau ausgesetzt ist [52], stellen sowohl Prävention als auch Behandlung der PTBS eine große Herausforderung dar. Insbesondere die mit 45 % nicht zu vernachlässigende Zahl an PTBS-Erkrankten, welche nicht zeitnah professionelle Hilfe in Anspruch nehmen [1], sollten durch ein umfangreiches Screening- und Diagnostikprogramm weiter vermindert werden. Besonders auch unter Wirtschaftlichkeits- und Zeitdruck moderner Gesundheitssysteme scheinen diese Hinweise interessant. Die Messung der HRV erscheint als kostengünstiges, nichtinvasives sowie zeitsparendes Mittel supportiver Diagnostik und Therapieverlaufbeurteilung bei PTBS-Erkrankten ebenso wie zur Diskriminierung mehr oder minder gestresster Personenpopulationen geeignet. Sie sollte in weiteren Studien genauer betrachtet werden, um eine Integration in den klinischen Alltag und somit eine Erschließung eines objektivierbaren Screening- und Verlaufsparameters für die PTBS und im Rahmen der Prävention für bis dahin Gesunde zu ermöglichen.

# Literaturverzeichnis

1. Wittchen HU, Schönfeld S, Kirschbaum C, Thurau C, Trautmann S, Steudte S, Klotzsche J, Höfler M, Hauffa R und Zimmermann P. Traumatische Ereignisse und posttraumatische Belastungsstörungen bei im Ausland eingesetzten Soldaten. *Deutsches Ärzteblatt International* 2012;109:559–68.
2. Wittchen HU, Jacobi F, Gaebel W und Maier W. Was sind die häufigsten psychischen Störungen in Deutschland. In: *DEGS-Symposium*. Robert Koch-Institut Berlin. 2012.
3. Psychotraumazentrum der Bundeswehr. Jahresmeldung 2018.
4. Seidler GH. Einleitung: Geschichte der Psychotraumatologie. In: *Posttraumatische Belastungsstörungen*. Hrsg. von Maercker A. Springer, 2009:105–24.
5. Shengold L. An attempt at soul murder: Rudyard Kipling's early life and work. *The Psychoanalytic Study of the Child* 1975;30:683–724.
6. Herman JL. Complex PTSD: A syndrome in survivors of prolonged and repeated trauma. *Journal of Traumatic Stress* 1992;5:377–91.
7. Horowitz MJ. Stress response syndromes. In: *International Handbook of Traumatic Stress Syndromes*. Hrsg. von Wilson J und Raphael B. Springer, 1993:49–60.
8. Dreßing H. Kriterien bei der Begutachtung der Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS). *Hessisches Ärzteblatt* 2016;5:271–4.
9. World Health Organization. Internationale Klassifikation psychischer Störungen: ICD-10 Kapitel V (F): Diagnostisch-klinische Leitlinien 10. Auflage. Hrsg. von Dilling H, Mombour W und Schmidt MH. Hogrefe, 2015.
10. World Health Organization. International Classification of Diseases ICD-11. Abgerufen am 16.05.2020 von <https://icd.who.int/browse11/l-m/en>.
11. Pausch MJ und Matten SJ. Trauma und Posttraumatische Belastungsstörung (PTBS) - Definition, Einteilung, Epidemiologie und Geschichte. In: *Trauma und Traumafolgestörung*. Hrsg. von Pausch MJ und Matten SJ. Springer, 2018:105–24.
12. American Psychiatric Association. Diagnostisches und Statistisches Manual psychischer Störungen DSM-5® 2. Auflage. Hrsg. von Falkai P und Wittchen HU. Hogrefe, 2018.
13. Maercker A. Symptomatik, Klassifikation und Epidemiologie. In: *Posttraumatische Belastungsstörungen*. Hrsg. von Maercker A. Springer, 2009:105–24.
14. Sack M. Der Einfluss akuter dissoziativer Symptome auf die autonom-vegetative Regulation. Habilitationsschrift. Medizinische Hochschule Hannover, 2005.

15. Flatten G, Gast U, Hofmann A, Knaevelsrud C, Lampe A, Liebermann P, Maercker A, Reddemann L und Wöllern W. S3-Leitlinie Posttraumatische Belastungsstörung. Trauma und Gewalt 2011;5:202–10.
16. Kessler RC, Sonnega A, Bromet E, Hughes M und Nelson CB. Posttraumatic stress disorder in the National Comorbidity Survey. Archives of General Psychiatry (Jama) 1995;52:1048–60.
17. Frommberger U, Angenendt J und Berger M. Posttraumatische Belastungsstörung - eine diagnostische und therapeutische Herausforderung. Deutsches Ärzteblatt International 2014;11:59–66.
18. Resnick H, Acierno R, Waldrop AE, King L, King D, Danielson C, Ruggiero KJ und Kilpatrick D. Randomized controlled evaluation of an early intervention to prevent post-rape psychopathology. Behaviour Research and Therapy 2007;45:2432–47.
19. Hoge CW, Auchterlonie JL und Milliken CS. Mental health problems, use of mental health services, and attrition from military service after returning from deployment to Iraq or Afghanistan. Jama 2006;295:1023–32.
20. Dohrenwend BP, Turner JB, Turse NA, Adams BG, Koenen KC und Marshall R. The psychological risks of Vietnam for US veterans: a revisit with new data and methods. Science 2006;313:979–82.
21. Eisen SA, Griffith KH, Xian H, Scherrer JF, Fischer ID, Chantarujikapong S, Hunter J, True WR, Lyons MJ und Tsuang MT. Lifetime and 12-month prevalence of psychiatric disorders in 8169 male Vietnam War era veterans. Military Medicine 2004;169:896–902.
22. Kulka RA, Schlenger WE, Fairbank JA, Hough RL, Jordan BK, Marmar CR und Weiss DS. Trauma and the Vietnam war generation: Report of findings from the National Vietnam Veterans Readjustment Study. Bd. 18. Brunner/Mazel psychosocial stress series. Brunner/Mazel, 1990.
23. Thomas JL, Wilk JE, Riviere LA, McGurk D, Castro CA und Hoge CW. Prevalence of mental health problems and functional impairment among active component and National Guard soldiers 3 and 12 months following combat in Iraq. Archives of General Psychiatry (Jama) 2010;67:614–23.
24. Thompson WW, Gottesman II und Zalewski C. Reconciling disparate prevalence rates of PTSD in large samples of US male Vietnam veterans and their controls. BMC Psychiatry 2006;6:19.
25. Fear NT, Jones M, Murphy D, Hull L, Iversen AC, Coker B, Machell L, Sundin J, Woodhead C, Jones N et al. What are the consequences of deployment to Iraq and Afghanistan on the mental health of the UK armed forces? A cohort study. The Lancet 2010;375:1783–97.

26. Sherin JE und Nemeroff CB. Post-traumatic stress disorder: the neurobiological impact of psychological trauma. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 2011;13:263–78.
27. Sammito S, Thielmann B, Zimmermann P und Böckelmann I. Einfluss einer posttraumatischen Belastungsstörung auf die Herzfrequenzvariabilität als Marker des autonomen Nervensystems - eine systematische Literaturübersicht. *Fortschritte der Neurologie Psychiatrie* 2015;83:30–7.
28. Fries E und Kirschbaum C. Chronischer Stress und stressbezogene Erkrankungen. In: *Stress- und Schmerzursachen verstehen. Gesundheitspsychologie und -soziologie in Prävention und Rehabilitation*. Hrsg. von Wippert P und Beckmann J. Thieme, 2009:113–25.
29. Brenner LA. Neuropsychological and neuroimaging findings in traumatic brain injury and post-traumatic stress disorder. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 2011;13:311–23.
30. McFall ME, Veith RC und Murburg MM. Basal sympathoadrenal function in post-traumatic distress disorder. *Biological Psychiatry* 1992;31:1050–6.
31. Cohen H, Kotler M, Matar MA, Kaplan Z, Miodownik H und Cassuto Y. Power spectral analysis of heart rate variability in posttraumatic stress disorder patients. *Biological Psychiatry* 1997;41:627–9.
32. Moon E, Lee SH, Kim DH und Hwang B. Comparative study of heart rate variability in patients with schizophrenia, bipolar disorder, post-traumatic stress disorder, or major depressive disorder. *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience* 2013;11:137–43.
33. Chalmers JA, Quintana DS, Abbott MJ, Kemp AH et al. Anxiety disorders are associated with reduced heart rate variability: a meta-analysis. *Frontiers in Psychiatry* 2014;5:80.
34. Fisher AJ und Woodward SH. Cardiac stability at differing levels of temporal analysis in panic disorder, post-traumatic stress disorder, and healthy controls. *Psychophysiology* 2014;51:80–7.
35. Sammito S, Thielmann B, Seibt R, Klusmann A, Weippert M und Böckelmann I. S2k-Leitlinie : Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft. AMWF online 2014. AWMF-Registernummer 002/042.
36. Chen JL, Chiu HW, Tseng YJ und Chu WC. Hyperthyroidism is characterized by both increased sympathetic and decreased vagal modulation of heart rate: evidence from spectral analysis of heart rate variability. *Clinical Endocrinology* 2006;64:611–6.

37. Karthik S, Pal G, Nanda N, Hamide A, Bobby Z, Amudharaj D und Pal P. Sympathovagal imbalance in thyroid dysfunctions in females: correlation with thyroid profile, heart rate and blood pressure. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology* 2009;53:243–52.
38. Kleiger RE, Stein PK und Bigger Jr JT. Heart rate variability: measurement and clinical utility. *Annals of Noninvasive Electrocardiology* 2005;10:88–101.
39. Elghozi JL, Girard A und Laude D. Effects of drugs on the autonomic control of short-term heart rate variability. *Autonomic Neuroscience* 2001;90:116–21.
40. Ungerer J, Kowalski JT, Kreim G, Hauffa R, Kropp S und Zimmermann P. Chronischer Stress bei Spezialkräften der Bundeswehr. *Trauma und Gewalt* 2015;9:236–43.
41. Selye H. Stress without distress. In: *Psychopathology of human adaptation*. Hrsg. von Serban G. Springer, 1976:137–46.
42. Schedlowski M, Tewes U und Schmoll HJ. Psychoneuroimmunologie. In: *Kompendium Internistische Onkologie*. Hrsg. von Schmoll HJ, Höffken K und K P. Springer, 1996:815–22.
43. Schulz P, Jansen LJ und Schlotz W. Stressreaktivität: theoretisches Konzept und Messung. *Diagnostica* 2005;51:124–33.
44. Lazarus RS. *Psychological stress and the coping process*. McGraw-Hill, 1966.
45. Pagani M, Mazzuero G, Ferrari A, Liberati D, Cerutti S, Vaitl D, Tavazzi L und Malliani A. Sympathovagal interaction during mental stress. A study using spectral analysis of heart rate variability in healthy control subjects and patients with a prior myocardial infarction. *Circulation* 1991;83:II43–51.
46. Berntson GG, Cacioppo JT und Quigley KS. Autonomic determinism: the modes of autonomic control, the doctrine of autonomic space, and the laws of autonomic constraint. *Psychological Review* 1991;98:459–87.
47. Bale TL. Stress sensitivity and the development of affective disorders. *Hormones and Behavior* 2006;50:529–33.
48. Kyrou I, Chrousos GP und Tsigos C. Stress, visceral obesity, and metabolic complications. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2006;1083:77–110.
49. Miller GE, Chen E und Zhou ES. If it goes up, must it come down? Chronic stress and the hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis in humans. *Psychological Bulletin* 2007;133:25–45.
50. Strike PC und Steptoe A. Psychosocial factors in the development of coronary artery disease. *Progress in Cardiovascular Diseases* 2004;46:337–47.

51. Saner. Stress als kardiovaskulärer Risikofaktor. *Therapeutische Umschau* 2005;62:597–602.
52. Hauffa R, Brähler E, Biesold KH und Tagay S. Psychische Belastungen nach Auslandseinsätzen. *Psychotherapie Psychosomatik Medizinische Psychologie* 2007;57:373–8.
53. Rau H, Brasse G, Ungerer J, Kowalski JT, Zimmermann P und Sammito S. Korrelation der Herzfrequenzvariabilität mit der empfundenen dienstlichen Belastung bei Angehörigen der Bundeswehr. *Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin* 2015;50:432–8.
54. Domniak P. Pharmakologische Beeinflussung des sympathischen und parasympathischen Nervensystems bei Herzrhythmusstörungen. In: *Autonomes Nervensystem und Herzrhythmusstörungen*. Hrsg. von Griebenow R und Gülker H. Bd. 71. Thieme, 1990.
55. Sammito S und Böckelmann I. Analyse der Herzfrequenzvariabilität. *Herz* 2015;40:76–84.
56. Berntson GG, Thomas Bigger Jr J, Eckberg DL, Grossman P, Kaufmann PG, Malik M, Nagaraja HN, Porges SW, Saul JP, Stone PH et al. Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology* 1997;34:623–48.
57. Billman GE. Heart rate variability - a historical perspective. *Frontiers in Physiology* 2011;2:86.
58. Burr RL und Cowan MJ. Autoregressive spectral models of heart rate variability: practical issues. *Journal of Electrocardiology* 1992;25:224–33.
59. Aubert AE, Seps B und Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine* 2003;33:889–919.
60. Rüdiger H, Klinghammer L und Scheuch K. The trigonometric regressive spectral analysis - a method for mapping of beat-to-beat recorded cardiovascular parameters on to frequency domain in comparison with Fourier transformation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 1998;58:1–15.
61. Rüdiger H, Henke S, Paditz E, Ziemssen T, Michael S und Frank S. Untersuchung zur Genauigkeit der Abtastung von EKG-Signalen für eine nachfolgende Spektralanalyse kontinuierlich gemessener RR-Intervalle im Schlaflabor. *Somnologie* 2006;10:53–60.
62. Mäkikallio TH, Tapanainen JM, Tulppo MP und Huikuri HV. Clinical applicability of heart rate variability analysis by methods based on nonlinear dynamics. *Cardiac Electrophysiology Review* 2002;6:250–5.
63. Schmidt G und Monfill G. Nonlinear methods for heart rate variability assessment. In: *Heart rate variability*. Hrsg. von Malik M und Camm A. Armonk: Futura, 1995:87–98.

64. Cottin F, Medigue C, Lopes P, Leprêtre PM, Heubert R und Billat V. Ventilatory thresholds assessment from heart rate variability during an incremental exhaustive running test. *International Journal of Sports Medicine* 2007;28:287–94.
65. Kaikkonen P, Hynynen E, Mann T, Rusko H und Nummela A. Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *European Journal of Applied Physiology* 2010;108:435–42.
66. Böckelmann I. Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV) - praktische Relevanz. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* 2012;62:275–9.
67. Schönauer M, Kautz C, Thomas A und Niebauer J. Kardiale autonome diabetische Neuropathie. *Diabetologie und Stoffwechsel* 2007;2:175–82.
68. Sammito S und Böckelmann I. Factors influencing heart rate variability. *International Cardiovascular Forum Journal* 2016;6:18–22.
69. Chang SJ, Koh SB, Choi HR, Woo JM, Cha BS, Park JK, Chen YH und Chung HK. Job stress, heart rate variability and metabolic syndrome. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine* 2004;16:70–81.
70. Karthikeyan P, Murugappan M und Yaacob S. Detection of human stress using short-term ECG and HRV signals. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 2013;13:1350038.
71. Michels N, Sioen I, Clays E, De Buyzere M, Ahrens W, Huybrechts I, Vanaelst B und De Henauw S. Children's heart rate variability as stress indicator: Association with reported stress and cortisol. *Biological Psychology* 2013;94:433–40.
72. Taelman J, Vandepuit S, Spaepen A und Van Huffel S. Influence of mental stress on heart rate and heart rate variability. In: *4th European conference of the international federation for medical and biological engineering*. Hrsg. von Vander Sloten J, Verdonck P, Nyssen M und Haueisen J. Bd. 22. Springer, 2009:1366–9.
73. McDuff D, Gontarek S und Picard R. Remote measurement of cognitive stress via heart rate variability. In: *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2014:2957–60.
74. Castaldo R, Melillo P, Bracale U, Caserta M, Triassi M und 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* 2015;18:370–7.
75. Paas FGWC, Van Merriënboer JJG und Adam JJ. Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and Motor Skills* 1994;79:419–30.
76. Jorna PG. Spectral analysis of heart rate and psychological state: A review of its validity as a workload index. *Biological Psychology* 1992;34:237–57.

77. Clemente-Suarez VJ, Palomera PR und Robles-Pérez JJ. Psychophysiological response to acute-high-stress combat situations in professional soldiers. *Stress and Health* 2018;34:247–52.
78. Tornero-Aguilera JF, Robles-Pérez JJ und Clemente-Suárez VJ. Use of psychophysiological portable devices to analyse stress response in different experienced soldiers. *Journal of Medical Systems* 2018;42.
79. Nikolova R, Aleksiev L und Vukov M. Psychophysiological assessment of stress and screening of health risk in peacekeeping operations. *Military Medicine* 2007;172:44–8.
80. Chang HA, Chang CC, Tzeng NS, Kuo TB, Lu RB und Huang SY. Decreased cardiac vagal control in drug-naïve patients with posttraumatic stress disorder. *Psychiatry Investigation* 2013;10:121–30.
81. Cohen H, Benjamin J, Geva AB, Matar MA, Kaplan Z und Kotler M. Autonomic dysregulation in panic disorder and in post-traumatic stress disorder: application of power spectrum analysis of heart rate variability at rest and in response to recollection of trauma or panic attacks. *Psychiatry Research* 2000;96:1–13.
82. Hauschildt M, Peters MJ, Moritz S und Jelinek L. Heart rate variability in response to affective scenes in posttraumatic stress disorder. *Biological Psychology* 2011;88:215–22.
83. Nagpal M, Gleichauf K und Ginsberg J. Meta-analysis of heart rate variability as a psychophysiological indicator of posttraumatic stress disorder. *Journal of Trauma & Treatment* 2013;3:1000182.
84. Shah AJ, Lampert R, Goldberg J, Veledar E, Bremner JD und Vaccarino V. Posttraumatic stress disorder and impaired autonomic modulation in male twins. *Biological Psychiatry* 2013;73:1103–10.
85. Shaikh al arab A, Guédon-Moreau L, Ducrocq F, Molenda S, Duhem S, Salleron J, Chaudieu I, Bert D, Libersa C, Vaiva G et al. Temporal analysis of heart rate variability as a predictor of post traumatic stress disorder in road traffic accidents survivors. *Journal of Psychiatric Research* 2012;46:790–6.
86. Song BA, Yoo SY, Kang HY, Byeon SH, Shin SH, Hwang EJ und Lee SH. Post-Traumatic Stress Disorder, Depression, and Heart-rate Variability among North Korean Defectors. *Psychiatry Investigation* 2011; 8:297–304.
87. Tan G, Dao TK, Farmer L, Sutherland RJ und Gevirtz R. Heart rate variability (HRV) and posttraumatic stress disorder (PTSD): a pilot study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 2011;36:27–35.

88. Tucker P, Pfefferbaum B, Jeon-Slaughter H, Khan Q und Garton T. Emotional stress and heart rate variability measures associated with cardiovascular risk in relocated Katrina survivors. *Psychosomatic Medicine* 2012;74:160–8.
89. Wahbeh H und Oken BS. Peak high-frequency HRV and peak alpha frequency higher in PTSD. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 2013;38:57–69.
90. Ramaswamy S, Selvaraj V, Driscoll D, Madabushi JS, Bhatia SC und Yeragani V. Effects of escitalopram on autonomic function in posttraumatic stress disorder among veterans of operations enduring freedom and Iraqi freedom (OEF/OIF). *Innovations in Clinical Neuroscience* 2015;12:13–9.
91. Schulz P, Schlotz W und Becker P. Trierer Inventar zum chronischen Stress: TICS. Hogrefe, 2004.
92. Derogatis LR und Melisaratos N. The Brief Symptom Inventory: an introductory report. *Psychological Medicine* 1983;13:595–605.
93. Pranke GH. Brief Symptom Inventory. *Zeitschrift für Medizinische Psychologie* 1997;3-4:159–66.
94. Foa E, Riggs DS und Gershuny BS. Arousal, numbing, and intrusion: Symptom structure of PTSD following assault. *The American Journal of Psychiatry* 1995;152:116–20.
95. Foa EB, Cashman L, Jaycox L und Perry K. The validation of a self-report measure of posttraumatic stress disorder: the Posttraumatic Diagnostic Scale. *Psychological Assessment* 1997;9:445–51.
96. Franke G. Symptom Checkliste (SCL-90-R). *Quality of Life Research* 1995;9:185–93.
97. Radtke FM, Franck M, Drews T, Weiß-Gerlach E, Twigg E, Harbeck-Seu A, Krampe H und Spies CD. Die posttraumatische Stressskala-14 (PTSS-14) - Validierung der richtlinienkonformen Übersetzung für den deutschsprachigen Raum. *Anästhesiologie Intensivmedizin Notfallmedizin Schmerztherapie* 2010;45:688–95.
98. Spitzer C, Hammer S, Löwe B, Grabe H, Barnow S, Rose M, Wingefeld K, Freyberger H und Franke G. Die Kurzform des Brief Symptom Inventory (BSI-18): erste Befunde zu den psychometrischen Kennwerten der deutschen Version. *Fortschritte der Neurologie Psychiatrie* 2011;79:517–23.
99. Ehlers A, Steil R, Winter H und Foa E. Deutsche Übersetzung der Posttraumatic Stress Diagnostic Scale (PDS). University of Oxford, Warneford Hospital, Department of Psychiatry 1996.
100. Kunzke D und Güls F. Diagnostik einfacher und komplexer posttraumatischer Störungen im Erwachsenenalter. *Psychotherapeut* 2003;48:50–70.

101. Griesel D, Wessa M und Flor H. Psychometric qualities of the German version of the Posttraumatic Diagnostic Scale (PTDS). *Psychological Assessment* 2006;18:262–8.
102. Margraf J. Mini-DIPS: Diagnostisches Kurz-Interview bei psychischen Störungen. Springer, 2013.
103. automation & software Günther Tausch GmbH. Benutzerhandbuch prenoscan®. Rev. 2.0. 2010.
104. Lee EAD und Theus SA. Lower heart rate variability associated with military sexual trauma rape and posttraumatic stress disorder. *Biological Research For Nursing* 2012;14:412–8.
105. Tan G, Teo I, Srivastava D, Smith D, Smith SL, Williams W und Jensen MP. Improving access to care for women veterans suffering from chronic pain and depression associated with trauma. *Pain Medicine* 2013;14:1010–20.
106. Mitani S, Fujita M, Sakamoto S und Shirakawa T. Effect of autogenic training on cardiac autonomic nervous activity in high-risk fire service workers for posttraumatic stress disorder. *Journal of Psychosomatic Research* 2006;60:439–44.
107. Green KT, Dennis PA, Neal LC, Hobkirk AL, Hicks TA, Watkins LL, Hayano J, Sherwood A, Calhoun PS und Beckham JC. Exploring the relationship between post-traumatic stress disorder symptoms and momentary heart rate variability. *Journal of Psychosomatic Research* 2016;82:31–4.
108. Liddell BJ, Kemp AH, Steel Z, Nickerson A, Bryant RA, Tam N, Tay AK und Silove D. Heart rate variability and the relationship between trauma exposure age, and psychopathology in a post-conflict setting. *BMC Psychiatry* 2016;16:133.
109. Dennis PA, Watkins L, Calhoun PS, Oddone A, Sherwood A, Dennis MF, Rissling MB und Beckham JC. Posttraumatic stress, heart-rate variability, and the mediating role of behavioral health risks. *Psychosomatic Medicine* 2014;76:629–37.
110. D’Souza JM, Wardle M, Green CE, Lane SD, Schmitz JM und Vujanovic AA. Resting Heart Rate Variability: Exploring Associations With Symptom Severity in Adults With Substance Use Disorders and Posttraumatic Stress. *Journal of Dual Diagnosis* 2018:1–6.
111. Cohen H, Moshe Kotler M, Matar M und Kaplan Z. Normalization of heart rate variability in post-traumatic stress disorder patients following fluoxetine treatment: preliminary results. *The Israel Medical Association Journal* 2000;2:296–301.
112. Nishith P, Duntley SP, Domitrovich PP, Uhles ML, Cook BJ und Stein PK. Effect of cognitive behavioral therapy on heart rate variability during REM sleep in female rape victims with PTSD. *Journal of Traumatic Stress: Official Publication of The International Society for Traumatic Stress Studies* 2003;16:247–50.

113. Frustaci A, Lanza GA, Fernandez I, Giannantonio M di und Pozzi G. Changes in psychological symptoms and heart rate variability during EMDR treatment: a case series of subthreshold PTSD. *Journal of EMDR Practice and Research* 2010;4:3–11.
114. Sack M, Lempa W, Steinmetz A, Lamprecht F und Hofmann A. Alterations in autonomic tone during trauma exposure using eye movement desensitization and reprocessing (EMDR) - Results of a preliminary investigation. *Journal of Anxiety Disorders* 2008;22:1264–71.
115. Zucker TL, Samuelson KW, Muench F, Greenberg MA und Gevirtz RN. The effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback on heart rate variability and posttraumatic stress disorder symptoms: A pilot study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 2009;34:135–43.
116. Criswell SR, Sherman R und Krippner S. Cognitive Behavioral Therapy with Heart Rate Variability Biofeedback for Adults with Persistent Noncombat-Related Posttraumatic Stress Disorder. *The Permanente Journal* 2018;22:17–207.
117. Kemp AH, Quintana DS, Gray MA, Felmingham KL, Brown K und Gatt JM. Impact of depression and antidepressant treatment on heart rate variability: a review and meta-analysis. *Biological Psychiatry* 2010;67:1067–74.

# Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Felix Paus, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Herzfrequenzvariabilität und psychometrische Testungen bei Bundeswehrsoldaten mit einsatzbedingter Posttraumatischer Belastungsstörung und nicht-einsatzbedingter Stressbelastung“ 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.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Erstbetreuer 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.“

# Curriculum vitae

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

# Danksagung

Besondereren Dank spreche ich meinem Doktorvater PD Dr. med. Zimmermann aus. Er stand mir zu jedem Zeitpunkt mit Geduld und Rat zur Seite, gab Rückendeckung und wusste beständig meine Motivation aufrecht zu erhalten. Den Unterstützungsrahmen bildete weiterhin das gesamte Team des Psychotraumazentrums der Bundeswehr unter Führung von Dr. med. Willmund, ohne deren Zuarbeit die vorliegende Arbeit nicht in diesem Rahmen möglich gewesen wäre. Dank gebührt in diesem Kontext besonders auch PD Dr. rer. nat. Girgensohn, welcher die Hauptlast der Statistik trug, ebenso wie PD Dr. med. habil. Sammito, einem unerschöpflichen Quell des Wissens rund um die Herzfrequenzvariabilität.

Besonders danke ich an dieser Stelle jedoch meinen Eltern Monika und Jürgen Paus, die selbst in schwierigsten Momenten die richtigen Worte fanden und deren Unterstützung ich bei Weitem mehr verdanke als eine vollendete Doktorarbeit.

An meiner Seite meine Partnerin Marisa, die wohl am besten versteht, welcher Kraftakt in diesen Seiten steckt, und die niemals müde wurde, mich in jeder Lage auf die ihr ureigene verrückt-liebende Art und Weise zu unterstützen.