



Westsächsische Hochschule Zwickau

University of Applied Sciences

HOCHSCHULE FÜR MOBILITÄT | UNIVERSITY FOR MOBILITY

Bachelorarbeit

Fakultät Physikalische Technik/Informatik

Studiengang Biomedizinische Technik

Untersuchung der Wirkungsweise der CO₂-Trockenbadtherapie mit Hilfe der HRV-Messung und einer Hyperspektralanalyse

Erstellt am

Heinrich-Braun-Klinikum Zwickau



Zur Erlangung des Akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Vorgelegt von: **Lauritz Schwab**, geboren am 16.05.1999

Matrikel-Nr.: 172144

Kenn-Nr.: 38359

Betreuer

Prof. Dr.- Ing. Leonore Heiland

Dr. med. Bernhard Karich

Einrichtung

Westsächsische Hochschule Zwickau

Heinrich-Braun-Klinikum Zwickau,

Klinik für Unfallchirurgie und physikalische
Medizin

Abgabetermin: 31.03.2022

Autorenreferat

Ziel dieser Arbeit ist es die Wirkungsweise der CO₂-Trockenbadtherapie zu untersuchen. Dies wurde unter Verwendung von zwei Messgeräten durchgeführt. Zum einen das VNS-Analyse Gerät der Firma COMMIT GmbH, mit dessen Hilfe die Herzratenvariabilitäts-Analyse durchgeführt wurde und zum anderen das Gerät der Firma „Diaspective Vision GmbH“, welches die Hyperspektral-Analyse ermöglichte. Die Untersuchungen wurden an Patienten der Unfallchirurgie des Heinrich-Braun-Klinikums durchgeführt. Diese sollten bisherige Kenntnisse festigen und konnten Effekte der Therapie auf das vegetative Nervensystem nachweisen.

Abstract

The aim of this work was to investigate the effects of the carbon acid therapy. This was accomplished with two different measurement systems. The first system was a device from the company COMMIT® GmbH which measures the activity of the vegetative nervous system by using a heart rate variability analysis. The other system was from the company Diaspective Vision GmbH, which made a hyper spectral analysis possible. The investigation took place in the trauma surgery at the Heinrich-Braun-Klinikum Zwickau and should ensure the previous effects of the therapy and proved effects on the vegetative nervous system.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Beteiligten danken, die mich bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank geht an die beiden Betreuer*innen Herr Dr. med. Bernhard Karich und Frau Prof. Dr.-Ing. Leonore Heiland, die mich während meines Praktikums und in der Zeit der Erstellung unterstützt haben.

Weiterer Dank geht an die Mitarbeiter im Bereich der Pflege und der Physiotherapie in der Unfallchirurgie im Heinrich-Braun-Klinikum Zwickau, für ein angenehmes Arbeitsklima.

Ferner möchte ich mich bei allen Patienten bedanken, die sich freiwillig für die Messreihen zur Verfügung stellten.

Außerdem möchte ich mich bei den Firmen „COMMIT GmbH“ und „Diaspective Vision GmbH“ für die Bereitstellung der Messsysteme, sowie bei der Firma „Unitronic GmbH“ für das Bereitstellen des Therapiegerätes, bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Autorenreferat	II
Abstract.....	II
Danksagung.....	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 CO ₂ -Trockenbadtherapie	2
2.1.1 Ablauf der CO ₂ -Trockenbadtherapie	2
2.1.2 Sicherheitstechnische Aspekte	3
2.1.3 Indikation und Kontraindikation	4
2.2 Gasaustausch im menschlichen Körper	5
2.2.1 Sauerstofftransport	5
2.2.2 Kohlenstoffdioxidtransport.....	5
2.2.3 Bohr- und Haldane-Effekt.....	6
2.3 Grundlagen der Herzratenvariabilität	7
2.3.1 Anatomie und Elektrophysiologie des Herzens	7
2.3.3 Messung eines Elektrokardiogramms	8
2.3.4 Herzfrequenzvariabilität	9
2.4 Vegetatives Nervensystem	11
2.5 Komplexes Regionales Schmerzsyndrom	12
3. Untersuchungen	14
3.1 Ablauf der Messungen.....	14
3.1.1 Messprinzip der HRV-Messung.....	14
3.1.2 Messprinzip der HSI-Messung	16
3.2 Beispiele aus dem Praktikum	16

3.2.1 Beispiel HRV-Messung	17
3.2.2 Beispiel HSI-Messung	18
4. Auswertung.....	19
4.1 HRV-Messung	19
4.1.1 Probandengruppen-Auswertung	26
4.1.2 Auswirkungen der Therapielänge.....	27
4.1.3 Vergleich der Teil- und Ganzkörpertherapie.....	32
4.1.4 Placebo-Messung	35
4.2 HSI-Messung	40
4.2.1 Lokale Wirkung	40
4.2.2 Systemische Wirkung	41
4.2.3 Therapieoptimierung	42
4.2.4 Placebo-Messung	44
5. Diskussion	46
6. Ausblick	48
Literatur.....	
Anhang	
Eigenständigkeitserklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ -Trockenbadtherapie.....	2
Abbildung 2: Vereistes Ventil (links) und Bedienfeld mit CO ₂ -Konzentrationsanzeige (rechts).....	3
Abbildung 3: Sauerstoffbindungskurve [10].....	6
Abbildung 4: Aufbau und Funktionsweise des Herzens.....	7
Abbildung 5: Schematische Darstellung der EKG-Kurve [15].....	9
Abbildung 6: Beispiel HRV-Messung [20].....	15
Abbildung 7: Messsystem der COMMIT GmbH [22].....	15
Abbildung 8: TIVITA® Tissue Messung	16
Abbildung 9: Rhythmogramm bei unterschiedlichen Belastungsstufen (Ordinate in ms, Abszisse in RR-Intervallen).....	17
Abbildung 10: HSI Beispielmessung	18
Abbildung 11: Rhythmogramm hohe (oben) und niedrige (unten) HRV (Ordinate in ms, Abszisse in Herzschläge).....	19
Abbildung 12: Beispiel Histogramm hohe (links) und niedrige (rechts) HRV	20
Abbildung 13: Beispiel Streudiagramm hohe (links) und niedrige (rechts) HRV	21
Abbildung 14: Frequenzspektrum bei Belastung (links) und in Ruhe (rechts).....	24
Abbildung 15: Vergleich der Alpha1- Werte	25
Abbildung 16: Parameter vor 20 Minuten CO ₂ -Therapie.....	28
Abbildung 17: Parameter während 20 Minuten CO ₂ -Therapie (nach 10 Minuten).....	29
Abbildung 18: Parameter nach 20 Minuten CO ₂ -Therapie.....	29
Abbildung 19: Parameter vor 40 Minuten CO ₂ -Therapie	30
Abbildung 20: Parameter während 40 Minuten CO ₂ -Therapie (nach 30 Minuten)	30
Abbildung 21: Parameter nach 40 Minuten CO ₂ -Therapie.....	31
Abbildung 22: Parameter vor 40 Minuten CO ₂ -Ganzkörpertherapie	32
Abbildung 23: Parameter während CO ₂ -Ganzkörpertherapie (nach 30 Minuten)	33
Abbildung 24: Parameter nach 40 Minuten Ganzkörpertherapie	33
Abbildung 25: verwendete Materialien während der Placebo- Messung.....	35
Abbildung 26: Temperaturverlaufskurve bei Messreihe mit Atemluft und CO ₂	36
Abbildung 27: Parameter vor CO ₂ Therapie	37
Abbildung 28: Parameter während CO ₂ -Therapie (20 Minuten)	37
Abbildung 29: Parameter nach CO ₂ -Therapie	38
Abbildung 30: Parameter vor Placebo-Messung	38
Abbildung 31: Parameter während Placebo-Messung.....	39
Abbildung 32: Parameter nach Placebo-Messung	39
Abbildung 33: Durchblutung (links) und Sauerstoffsättigung (rechts) vor (oben) und nach (unten) der Therapie	40
Abbildung 34: HSI-Messung systemische Wirkung vor Therapie	41
Abbildung 35: HSI-Messung systemische Wirkung nach Therapie.....	41
Abbildung 36: Oxygenierung bei verschiedenen Lotionen.....	42
Abbildung 37: HSI-Messung vor CO ₂ -Therapie	44
Abbildung 38: HSI- Messung nach CO ₂ -Therapie	44
Abbildung 39: HSI-Messung vor Placebo-Therapie.....	45
Abbildung 40: HSI-Messung nach Placebo-Therapie	45
Abbildung 41: HRVTool by Marcus Vollmer [27]	i
Abbildung 42: Diagramme vor 20 Minuten CO ₂ -Therapie	iii
Abbildung 43: Diagramme während 20 Minuten CO ₂ -Therapie (nach 10 Minuten).....	iii
Abbildung 44: Diagramme nach 20 Minuten CO ₂ -Therapie	iv
Abbildung 45: Diagramme vor 40 Minuten CO ₂ -Therapie.....	iv
Abbildung 46: Diagramme während 40 Minuten CO ₂ -Therapie (nach 30 Minuten).....	v

Abbildung 47: Diagramme nach 40 Minuten CO ₂ -Therapie	v
Abbildung 48: Diagramme vor 40 Minuten CO ₂ -Ganzkörpertherapie	vi
Abbildung 49: Diagramme während 40 Minuten CO ₂ -Ganzkörpertherapie (nach 30 Minuten)	vi
Abbildung 50: Diagramme nach 40 Minuten Ganzkörpertherapie	vii
Abbildung 51: Diagramme vor CO ₂ Therapie.....	viii
Abbildung 52: Diagramme während CO ₂ -Therapie	viii
Abbildung 53: Diagramme nach CO ₂ -Therapie	ix
Abbildung 54: Diagramme vor Placebo Messung.....	ix
Abbildung 55: Diagramme während Placebo Messung	x
Abbildung 56: Diagramme nach Placebo-Messung.....	x
Abbildung 57: Vor Behandlung mit CO ₂	xi
Abbildung 58: Während Behandlung mit CO ₂	xi
Abbildung 59: Nach Behandlung mit CO ₂	xii
Abbildung 60: Messreihe Oxygenierung Systemische Wirkung.....	xv

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertung Veränderung nach Therapie	26
Tabelle 2: Quantitative Veränderung der Zeitbereichsparameter	26
Tabelle 3: Zeitbereichsparameter Vor und Nach der Therapie	ii
Tabelle 4: Veränderung der Zeitbereichsparameter	ii
Tabelle 5: Temperaturmessung bei CO ₂ Therapie	xiii
Tabelle 6: Temperaturmessung bei Luft.....	xiv

Abkürzungsverzeichnis

CAT	Carbon Acid Therapy
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease
CRPS	Complex Regional Pain Syndrome
EKG	Elektrokardiogramm
HF	High Frequency
HRV	Herzratenvariabilität/ Herzfrequenzvariabilität
HSI	Hyper Spectral Imaging
Km/h	Kilometer pro Stunde
LF	Low Frequency
ms	Millisekunden
NIR	Nahinfrarot
nm	Nanometer
O ₂	Sauerstoff
ppm	Parts per Million
RGB	Rot-Grün-Blau
RMSSD	Root Mean Square of Successive Differences
RSA	Respiratorische Sinusarrhythmie
SDNN	Standard Deviation Normal to Normal
SI	Stressindex
StO ₂	Sauerstoffsättigung
THI	Tissue Hämoglobin Index
TWI	Tissue Water Index
VLF	Very Low Frequency
VNS	Vegetatives Nervensystem

1 Einleitung

Natürliche Kohlensäurebäder werden seit dem 19. Jahrhundert als kurative Therapiemöglichkeit eingesetzt und finden in Nass- und Trockenanwendung bis heute Verwendung. Die Verbesserung der Durchblutung, die gesteigerte Wundheilungsgeschwindigkeit und die antibakterielle Wirkung sind nur einige der positiven Effekte, welche diese Therapie mit sich bringt. Durch diese Erkenntnisse wird die Therapie in Trockenanwendung seit den 1970er Jahren auf der Unfallchirurgie im Heinrich-Braun-Klinikum eingesetzt, um eine bessere Behandlung bestimmter Krankheitsbilder zu schaffen. Seit dem Jahr 2016 wird ein mobiles Gerät der Firma Unitronic verwendet, was eine Behandlung der Patienten im Zimmer ermöglicht. [1]

Ein weiteres Anwendungsgebiet der CO₂-Trockenbadtherapie ist die Sportmedizin. Durch die positive Wirkung auf Wund- und Knochenheilung können die Ausfallzeiten nach Sportverletzungen reduziert werden und die Sportler sind schneller wieder einsatzfähig. Außerdem gibt es Anzeichen darauf, dass die CO₂-Trockenbadtherapie nicht nur eine effektivere Behandlung bei Verletzungen schafft, sondern auch das vegetative Nervensystem beeinflusst. Bisherige Untersuchungen zeigten eine erhöhte parasympathische Aktivität, was zur Unterstützung regenerativer Prozesse und somit zur Leistungssteigerung der Sportler führt. [2]

Durch die möglichen Effekte auf das vegetative Nervensystem könnte die Therapie außerdem neue Möglichkeiten zur Behandlung von anderen Krankheitsbildern bieten. Besonders Krankheitsbilder wie Morbus Sudeck (CRPS) können so gezielter und effektiver behandelt werden.

Diese Arbeit schafft im weiteren Verlauf einen Überblick über die Effekte der CO₂-Trockenbadtherapie. Dazu wurden auch vorherige wissenschaftliche Arbeiten [3, 4] über dieses Thema einbezogen, um die bisherigen Erkenntnisse zu überprüfen. Außerdem soll die Wirkung der Therapie auf das vegetative Nervensystem gezeigt werden.

2 Grundlagen

2.1 CO₂-Trockenbadtherapie

2.1.1 Ablauf der CO₂-Trockenbadtherapie

Die Therapie wurde im HBK mit dem Gerät MedicalCAT der Firma Unitronic GmbH durchgeführt. In Abbildung 1 ist der Therapieaufbau dargestellt.



Abbildung 1: CO₂-Trockenbadtherapie

Das Therapiesystem besteht aus drei Hauptbestandteilen: der CO₂-Gasflasche, dem Gerät der Firma „Unitronic Elektronische Steuergeräte GmbH“ und der biokompatiblen Behandlungshülle. Zuerst wird die Behandlungshülle mit Hilfe eines elastischen Gurtes am Patienten befestigt. Nach Überprüfung der Behandlungshülle auf Beschädigungen, wird über einen kleinen Schnitt im unteren Bereich der Hülle, das Schlauchsystem des Gerätes, unter Verwendung eines Schraubverschlusses verbunden. Der am Gerät befestigte zweite Schlauch wird als Abgasschlauch an ein geeignetes Abluftsystem angeschlossen. Nach Anschluss der Schläuche wird über ein Bedienfeld am oberen Teil der Vorrichtung die Behandlungshülle evakuiert, was je nach Volumen der Behandlungshülle 20-60 Sekunden benötigt. Nach vollständiger Evakuierung wird das Ventil der Gasflasche aufgedreht. Über das Bedienfeld kann die Temperatur, Zeit und das Gasvolumen eingestellt werden. Eine Therapieeinheit im HBK nimmt zwanzig Minuten in Anspruch. Je nach Umgebungstemperatur variiert die Behandlungstemperatur von 30 bis 35 Grad Celsius und die Behandlungshülle fasst ein Gasvolumen von 60-90 Litern. In den unterschiedlichen Anwendungsgebieten kann dieses angepasst werden, da die Therapie als Teilbehandlung einzelner Extremitäten und als Ganzkörpertherapie möglich ist. Nach Beendigung der Therapie wird die Behandlungshülle erneut evakuiert, vom Patienten entfernt und entsorgt.

2.1.2 Sicherheitstechnische Aspekte

Da CO₂ ein Gas ist, welches mit gesundheitlichen Risiken verbunden ist und bei einer relativen Konzentration von über 8 % zum Tode führen kann, sind folgende Aspekte zu beachten.

Die Therapie wird in einem gut durchlüfteten Raum durchgeführt, so kann garantiert werden, dass die CO₂-Konzentration nicht über den Schwellwert steigt. Dazu ist ein spezieller Sensor im Gerät, auf einem Meter Höhe über dem Boden, verbaut, der die Konzentration der CO₂ Moleküle in ppm angibt. Deshalb ist zu beachten, dass der Patient sich nicht unterhalb des Sensors befindet, da sich CO₂ durch seine physikalischen Eigenschaften am Boden anreichert. Bei Anstieg über 5000 ppm gibt das Gerät einen Signalton aus und eine gelbe Lampe leuchtet auf. Ab einer Konzentration von über 10000 ppm leuchtet eine rote Lampe auf, die eine deutlich erhöhte Konzentration signalisiert. In diesem Fall sind schnelles Lüften und ein Abbruch der Therapie erforderlich. Die Anzeige ist in Abbildung 2 dargestellt.

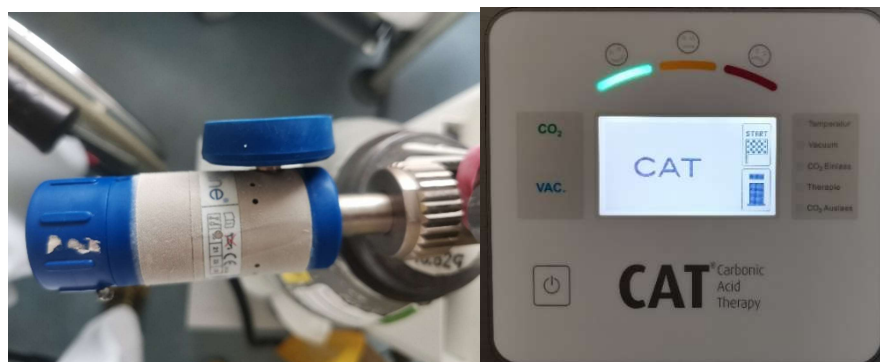


Abbildung 2: Vereistes Ventil (links) und Bedienfeld mit CO₂-Konzentrationsanzeige (rechts)

Ein weiterer wichtiger sicherheitstechnischer Aspekt ist das Vereisen des Ventils (Abbildung 2). Aufgrund der Temperaturunterschiede und Luftfeuchtigkeits-Schwankungen in der Umgebung kann es vorkommen, dass durch die rasche Abkühlung beim Entspannen des Gases, das Ventil an der Gasflasche vereist („Joule-Thompson-Effekt“). In dem Fall muss die Therapie kurzzeitig unterbrochen werden, um das erhöhte Ausströmen des Gases zu verhindern.

2.1.3 Indikation und Kontraindikation

Die Anwendungsgebiete der CO₂-Trockenbadtherapie sind verschieden. Derzeit wird die Therapie im HBK in der Unfallchirurgie, Gefäßchirurgie, Dermatologie und in der Sportmedizin eingesetzt.

Indikatoren sind [5]:

- Arterielle Hypertonie
- CRPS, Morbus Sudeck
- Störungen der Mikrozirkulation
- Periphere Arterielle Verschlusskrankheit
- Fibromyalgie

Kontraindikatoren sind [6]:

- Thrombose
- Frischer Herzinfarkt
- Infektionskrankheiten
- Epilepsie
- Chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD)
- Maligne Erkrankungen (z.B. Karzinome)
- Infektiöse Hautkrankheiten

2.2 Gasaustausch im menschlichen Körper

Die CO₂-Therapie nutzt bestimmte Effekte des Gasaustausches im menschlichen Körper als Grundlage. Diese Effekte sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

2.2.1 Sauerstofftransport

Sauerstoff wird über die Wände der Alveolen, durch Diffusion, aufgrund des erhöhten Partialdrucks, aufgenommen. Dabei wird das im Blut enthaltene Hämoglobin mit Sauerstoff angereichert (Oxygenierung). Die Weiterleitung des oxygenierten Blutes erfolgt über die Lungenkapillare und wird über die Lungenvenen hin zum linken Vorhof des Herzens transportiert, wo es über die Aorta in den Körperkreislauf gelangt (siehe 2.3.1). Im peripheren Gewebe wird der Sauerstoff durch Diffusion abgegeben. [7]

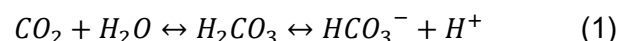
2.2.2 Kohlenstoffdioxidtransport

Kohlenstoffdioxid wird im Körper über drei verschiedene Mechanismen transportiert. Als gelöster Stoff im Blut, gebunden an Hämoglobin und in Form von Bikarbonat.

Gelöstes Kohlendioxid (CO₂) lässt sich über den Partialdruck im Blut ermitteln und macht 7 % der Transportvorgänge aus. In Etwa 23% des CO₂ wird an Hämoglobin gebunden. Der Großteil der Transportvorgänge wird über den Bikarbonatpuffer umgesetzt (ca. 70%). Das in den Zellen abgegebene Kohlendioxid (CO₂) wird über das Blut von den Erythrozyten aufgenommen und reagiert mit dem vorhandenen Wasser (H₂O) zu Kohlensäure (H₂CO₃). Dieser Effekt verläuft durch das vorhandene Enzym Carboanhydrase deutlich schneller als bei den anderen Transportmechanismen. Die vorhandene Kohlensäure dissoziiert danach zu Wasserstoff-Ionen (H⁺) und Bikarbonat (HCO₃⁻). Die Wasserstoff-Ionen werden vom Hämoglobin aufgenommen und das Bikarbonat diffundiert aus den Erythrozyten im Austausch gegen Chlorid-Ionen, um die Ladungsverhältnisse zu erhalten.

In dem Bereich der Lunge findet dieser Mechanismus umgedreht statt (Haldane-Effekt). Bikarbonat wird im Austausch gegen die Chlorid-Ionen an die Erythrozyten gebunden und reagiert mit den vorhandenen H⁺-Ionen zu Kohlensäure. Diese dissoziiert sich wiederum zu H₂O und CO₂. [8]

Dieser Prozess ist zusammengefasst in folgender Formel beschreiben:



2.2.3 Bohr- und Haldane-Effekt

Der nach dem Physiologen Christian Bohr (1855-1911) benannte Effekt, beschreibt die Abhängigkeit von der Bindungsaffinität von Sauerstoff an Hämoglobin und des pH-Wertes der Umgebung.

Wird der CO_2 -Partialdruck im Blut erhöht, sinkt der pH-Wert des Gewebes ab und die Bindungsaffinität von Sauerstoff an Hämoglobin wird verringert. Das Absenken des pH-Wertes führt dabei zu einer indirekten Verminderung der Sauerstoffbindungsaffinität an Hämoglobin. Das führt dazu, dass Sauerstoff im peripheren Gewebe leichter abgegeben wird und im Bereich der Lunge leichter aufgenommen werden kann. [9]

Dieser Effekt lässt sich umkehren. Bei der Senkung des CO_2 - Partialdrucks und der daraus entstehenden Erhöhung des pH-Wertes wird die Bindungsaffinität von Sauerstoff an das Hämoglobin erhöht und Sauerstoff kann besser aufgenommen werden. Ein Beispiel ist die Sauerstoffaufnahme über die Lunge. Dieser Prozess wird als Haldane Effekt bezeichnet. [10]

Anhand der Sauerstoffbindungskurve in Abbildung 3 ist eine Rechts- und Linksverschiebung zu erkennen. Die Rechtsverschiebung beschreibt, dass bei erhöhter Kohlendioxid-Konzentration im Blut (Hyperkapnie) weniger Sauerstoff am Hämoglobin gebunden wird, da es leichter in die Peripherie abgegeben werden kann. Im Gegensatz dazu kann sich mehr Sauerstoff an Hämoglobin binden, bei geringerem Sauerstoff- Partialdruck. Die CO_2 -Trockenbadtherapie nutzt besonders den Bohr-Effekt als Grundlage, um eine gesteigerte Versorgung von Sauerstoff in der Peripherie zu generieren.

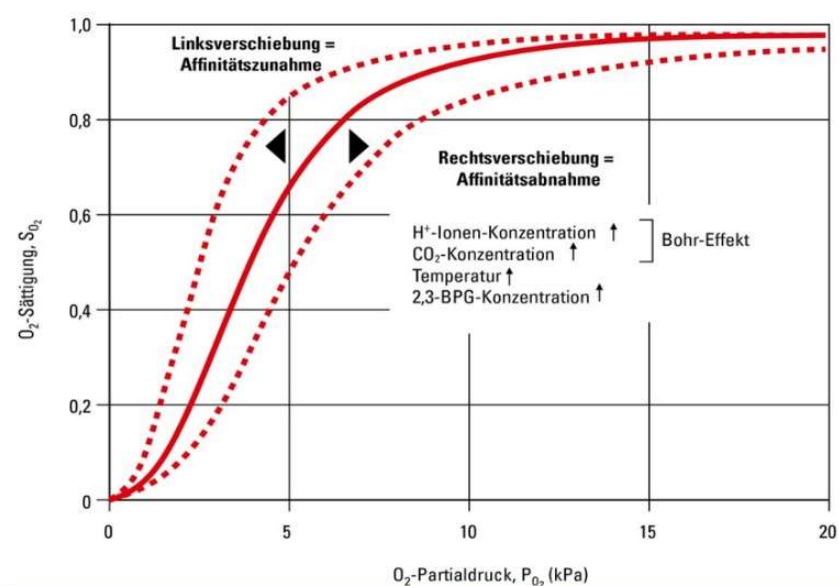


Abbildung 3: Sauerstoffbindungskurve [11]

2.3 Grundlagen der Herzratenvariabilität

2.3.1 Anatomie und Elektrophysiologie des Herzens

Der Herzmuskel besteht aus zwei Herzhälften, mit insgesamt vier Herzhöhlen. Unterschieden wird in die rechte Herzhälfte, die für die Blutversorgung des Lungenzyklus zuständig ist und in die linke Herzhälfte, welche den Körperkreislauf versorgt. Beide Herzhälften besitzen jeweils einen Vorhof (Atrium) und eine Kammer (Ventrikel), die durch Herzklappen unterteilt werden. Durch die Sogwirkung bei Entspannung des Herzmuskels, wird das sauerstoffarme Blut über die untere und obere Hohlvene in den rechten Vorhof befördert, wo es über die geöffnete Trikuspidalklappe in die rechte Kammer gelangt. Durch Kontraktion des Herzens entsteht ein erhöhter Druck in der Kammer, welcher zur Schließung der Trikuspidalklappe und Öffnung der Pulmonalklappe führt. Durch die Druckerhöhung wird das sauerstoffarme Blut über die Lungenvene dem Lungenkreislauf zugeführt, wo es mit Sauerstoff angereichert wird, und Kohlendioxid abgibt (siehe 2.2). Das oxygenierte Blut wird danach über den linken Vorhof, durch die Mitralklappe, in die linke Herzkammer befördert. Bei Kontraktion des Herzens schließt sich die Mitralklappe und durch die Druckerhöhung wird das sauerstoffreiche Blut nach Öffnung der Aortenklappe, über die Aorta, dem Körperkreislauf zugeführt. Bei Verteilung im Gewebe wird Sauerstoff abgegeben und Kohlendioxid aufgenommen (siehe 2.2). Der Ablauf beider Kreisläufe findet parallel statt. [12] Dieser Vorgang ist anhand Abbildung 4 dargestellt.

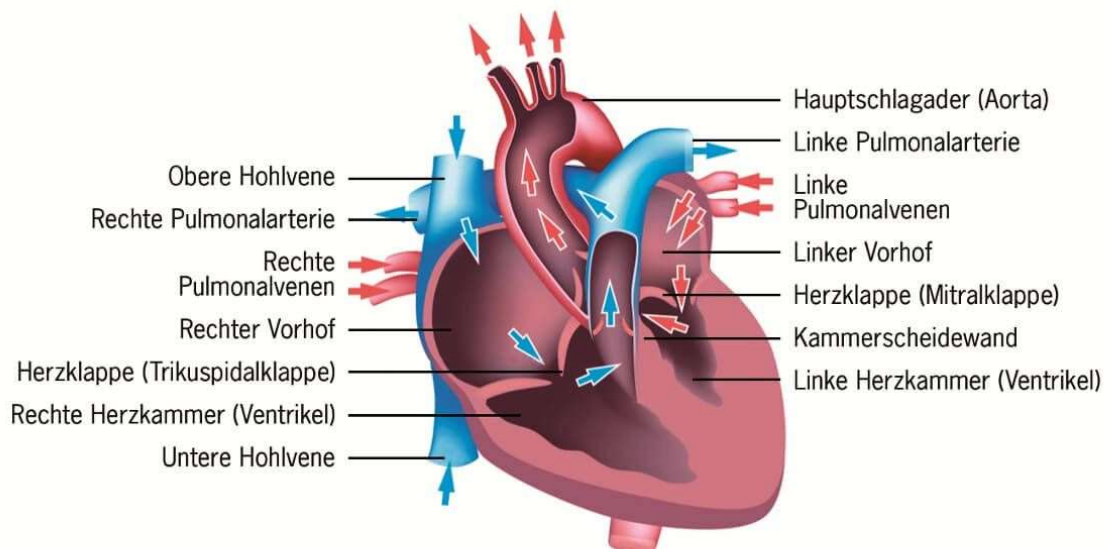


Abbildung 4: Aufbau und Funktionsweise des Herzens

Anders als bei glatter und Skelettmuskulatur verläuft die Erregungsbildung und Weiterleitung des Herzmuskels speziell. Über sogenannte Schrittmacherzellen wird das Herz autonom erregt und elektrische Reize können über diese verteilt werden. Das erste Schaltzentrum der Zellen wird als Sinusknoten bezeichnet und befindet sich an der Mündungsstelle zur oberen Hohlvene im rechten Vorhof. Durch De- und Repolarisation entstehen Potentialunterschiede, die als elektrisches Signal über den am Boden des rechten Vorhofs liegenden AV-Knoten weitergegeben werden. Diese zweite Schaltstelle leitet die elektrischen Reize zum His'schen-Bündel. Im Anschluss wird das elektrische Signal über den linken und rechten Tawara-Schenkel bis hin zu den Purkinje-Fasern geleitet, wo es die Kammermuskulatur erregt. [12, S. 252 ff.; 13]

Die damit weitergeleitete Erregung an die motorischen Endplatten führt zur Kontraktion des Herzens.

2.3.3 Messung eines Elektrokardiogramms

Durch ein Elektrokardiogramm lassen sich die im vorherigen Abschnitt beschriebene Erregungsbildung und Weiterleitung des Herzens messen und abbilden. Die Grundlage bildet die Messung der elektrischen Potentialunterschiede, die sich vom Herzen über die Körperoberfläche ausbreiten.

Die Messung wird mit Hilfe von non-invasiven Elektroden durchgeführt, die auf der Hautoberfläche angebracht werden. Dabei gibt es verschiedene Standardableitungen wie die Ableitung nach Einthoven, Goldberger oder Wilson. Einfachere EKG-Ableitungen lassen sich jedoch auch mit zwei Elektroden messen, wie es z. B. bei einem EKG-Brustgurt der Fall ist.

Mit Hilfe des Herzvektors der positiv zur Herzspitze und negativ zur Herzbasis zeigt, lassen sich die Impulse jeweils räumlich zuordnen. Bei Erregung zur Herzspitze hin wird der Wert positiv und in Richtung Basis negativ. Der Verlauf des Summenvektors ergibt die typische EKG-Kurve. Zur Darstellung werden die gemessenen Potentialunterschiede in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. [14]

Die Kurve lässt sich in verschiedene Bereiche und Punkte einteilen, wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Die P-Welle wird bei Erregung der Vorhöfe aufgezeichnet. Darauf folgt der QRS-Komplex, der die Depolarisation beider Kammern beschreibt und die T-Welle, welche die Erregungsrückbildung der Kammern abbildet. [15]

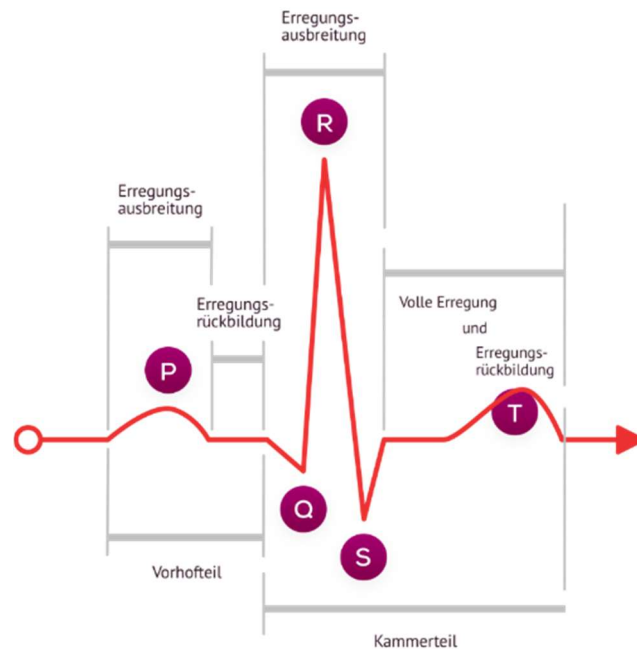


Abbildung 5: Schematische Darstellung der EKG-Kurve [16]

2.3.4 Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenzvariabilität (HRV) beschreibt, wie stark die zeitlichen Schwankungen einzelner RR-Intervalle über einen definierten Zeitraum oder einer Anzahl an Herzschlägen sind. Dabei gilt: je größer die Schwankungen zwischen den Intervallen sind, desto besser kann sich der menschliche Organismus an exogene und endogene Faktoren anpassen.

Bei Veränderung dieser Faktoren werden somit auch die sympathischen und parasympathischen Aktivitäten im Organismus beeinflusst. Den größten Faktor stellt dabei die Muskelaktivität dar. Bei Erhöhung der körperlichen Aktivität sinkt die HRV und erhöht sich in liegendem Zustand oder Entspannung. [17]

Einen weiteren Einfluss hat die Atmung. Zum einen durch die unterschiedlichen Konzentrationsverhältnisse von Sauerstoff und Kohlendioxid im Blut, sowie durch die respiratorische Sinusarrhythmie. Diese beschreibt, dass die Herzfrequenz bei Inspiration ansteigt und bei Expiration sinkt. Die Entstehung dieser Herzfrequenzmodulation ist umstritten und umfasst das Zusammenspiel von verschiedenen Rezeptoren. Zum einen reagieren die Barorezeptoren des Aortenbogens auf Blutdruckunterschiede und leiten sympathikushemmende Reize an den Nervus Vagus, welcher die Herzfrequenz sinken lässt. Zum anderen reagieren Chemorezeptoren auf Konzentrationsunterschiede von Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff im Blut, welches bei einem erhöhten Kohlenstoffdioxidpartialdruck (Hyperkapnie) zu einer Verstärkung der RSA führen kann. Eine Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks (Hypoxie) führt hingegen zur Verminderung der RSA,

welche zu einer erhöhten Herzfrequenz und Blutdruck führt. Außerdem werden bei Inspiration Dehnungsrezeptoren angesteuert, welche die Herzfrequenz steigen lassen. [18]

Im Folgenden werden einige Faktoren genannt, welche die Herzratenvariabilität beeinflussen können und die bei Messungen berücksichtigt werden sollten.

Physiologisch:

- Veränderung der Erregungsweiterleitung im Herzen
- Hormonelle Störungen
- Bewegung/ Lageänderung
- Atmung/ Gasaustausch
- Schlaf
- Alter
- Blutdruck
- Genetische Faktoren
- Geschlecht
- Pharmaka
- Lebensstil

Psychologisch:

- Stress
- Aufregung
- Emotionale Verarbeitung

Im Gegensatz zu der Aufzeichnung von Herzfrequenz oder EKG werden nicht die Herzschläge über die Zeit ermittelt, sondern die zeitlichen Abstände zwischen den Herzschlägen. (siehe 3.2.1).

2.4 Vegetatives Nervensystem

Das vegetative oder auch autonome Nervensystem fungiert autonom und reguliert alle Körperfunktionen, die nicht explizit durch Gedanken gesteuert werden können. Die Funktionen umfassen z. B. Atmung, Blutdruckregulation, Herzschlag, Pupillenstellung und Darmaktivität, wobei beim letzten Punkt in das enterische Nervensystem oder Darmnervensystem unterteilt wird.

Das VNS besteht aus zwei verschiedenen Teilbereichen, die gegensätzliche Wirkungen im Organismus auslösen und somit als Gegenspieler agieren. Zum einen den Sympathikus der bei nach außen gerichteten Aktivitäten (z. B. Stress, körperliche Aktivität) angeregt wird und zum anderen den Parasympathikus der bei innen gerichteten Körperfunktionen (z. B. Nahrungsaufnahme) aktiv wird. [12, S.168]

Anatomisch lassen sich Parasympathikus und Sympathikus in periphere und zentrale Anteile trennen. Das zentrale System des Parasympathikus sitzt im Hirnstamm und im Sakralmark, während der Sympathikus im Thorakal- und Lumbalmark lokalisiert ist. [19, S. 294 ff.]

Physiologisch agiert der Sympathikus über das Ausschütten der Hormone Adrenalin und Noradrenalin, welche die β -adrenergen Rezeptoren anregen. Der parasympathische Einfluss beruht auf der Freisetzung von Acetylcholin über den Nervus Vagus. Durch die höherfrequenten elektrischen Impulse des Parasympathikus im Gegensatz zum Sympathikus, wirken die vagalen Effekte schneller. Ein Beispiel dafür ist die verzögerte Herzfrequenzsteigerung bei körperlicher Aktivität und schnelle Senkung bei der Erholungsphase. [17]

Da ständig äußere Einflüsse auf den menschlichen Organismus eingehen muss das VNS anpassungsfähig sein, um die optimale Anpassung an die Bedürfnisse des Körpers zu garantieren. Das bedeutet, dass parasympathischer und sympathischer Anteil immer im Gleichgewicht agieren müssen, um keine Funktionsstörung hervorzurufen.

Diese Anpassungsfähigkeit wird mittels einer Herzratenvariabilitätsanalyse ermittelt und gibt Rückschlüsse auf die neurovegetative Aktivität.

2.5 Komplexes Regionales Schmerzsyndrom

Das komplexe regionale Schmerzsyndrom (CRPS) ist ein Krankheitsbild, welches sowohl sensorische, motorische als auch autonome Prozesse im Körper beeinflusst. Dies führt zu einem meist chronischen Verlauf der Krankheit. Ausgelöst wird diese durch eine Verletzung an den Extremitäten durch eine Fraktur oder des Weichteilgewebes.

Die genauen Ursachen zur Entstehung sind bis heute nicht genau erforscht, es ist aber davon auszugehen, dass die Patienten besonders im dritten Stadium eine verstärkte sympathische Übersteuerung des vegetativen Nervensystems aufweisen.

Die Symptome sind von Patient zu Patient verschieden und werden in drei verschiedene Stadien eingeteilt. Im ersten Stadium finden erste entzündliche Prozesse statt, welche die betroffene Region erwärmen, erröten und anschwellen lassen. Bei fortschreitender Erkrankung kommt es im nächsten Stadium zur Versteifung der Muskulatur und Entkalkung der Knochen (Demineralisierung). Die Haut ist im Gegensatz zum ersten Stadium eher kühl und blass. Diese Phase wird auch als dystrophes Stadium bezeichnet. Ein CRPS im dritten Stadium zeichnet sich durch ausgeprägte Einschränkungen in sensorischen, motorischen und autonomen Prozessen ab und wird als atrophes Stadium bezeichnet. Störung der Sensorik sind chronische Schmerzen, Missempfindungen und übermäßiges Schmerzempfinden sowie Körperwahrnehmungsstörungen. Die Motorik ist durch Einschränkung der Beweglichkeit, Kraftminderung und selten auch Muskelzuckungen gestört. Eine Störung des VNS ist durch Wassereinlagerungen, veränderte Hautdurchblutung (Hyperämie), vermehrter Haarwuchs und starkes Schwitzen an der betroffenen Stelle geprägt. Diese Symptome sind auf die Fehlregulation des vegetativen Nervensystems und die Übersteuerung des Sympathikus zurückzuführen. [20]

Bei ausgeprägtem Krankheitsbild im dritten Stadium, ist meist auch eine erhöhte psychische Belastung des Patienten zu beobachten, welche die bestehenden Symptome verstärken.

Die Behandlung von CRPS wird durch eine interdisziplinäre Therapie an den Patienten angepasst. Je nach Schwere der Erkrankung werden medikamentöse, Physio- und Ergotherapien genutzt. Die medikamentöse Therapie beinhaltet die Gabe von Analgetika, um die Schmerzen zu lindern. Außerdem werden ergotherapeutische Behandlungen wie die Spiegeltherapie genutzt, um die Schmerzempfindlichkeit zu senken und ein Einbringen der betroffenen Region in die Bewegungsabläufe zu ermöglichen. Die physiotherapeutische Behandlung wird durch Zellenbäder, Schwellstrom- und Ultraschalltherapie, Lymphdrainagen sowie der CO₂-Trockenbadtherapie durchgeführt. [20]

Besonderer Wert wird im Heinrich-Braun-Klinikum auf die tägliche Durchführung der CO₂-Trockenbadtherapie gelegt. Die Therapie konnte in der Vergangenheit nicht nur eine schmerzlindernde Wirkung erzielen, sondern auch die Schmerzempfindlichkeit senken und die erhöhte Oxygenierung (Hyperämie) normalisieren. [4]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll geprüft werden, ob die Therapie weitere positive Einflüsse auf das vegetative Nervensystem eines CRPS-Patienten hat.

3. Untersuchungen

Die Untersuchungen der HRV-Messung wurden an insgesamt 19 verschiedenen Patienten durchgeführt, die auf der Unfallchirurgie im HBK Zwickau mit der CO₂-Trockenbadtherapie behandelt wurden. Das Altersspektrum erstreckt sich von 17 bis 66 Jahren. Dabei handelte es sich um 15 männliche und vier weibliche Personen, die unterschiedliche Krankheitsbilder der Extremitäten aufzeigten. Die häufigsten Verletzungen waren Sprunggelenksfrakturen, Tibiakopffrakturen, Fersenbeinfrakturen, Weichteilverletzungen, Amputationen und Morbus Sudeck (CRPS).

Die Probandenanzahl der HSI-Messung beläuft sich auf fünf Personen, da der Messaufbau im Vergleich mit der HRV-Messung aufwendiger gestaltet werden musste.

Zusätzlich wurden Messungen an einem Sportler des FSV Zwickau und an zwei freiwilligen Personen durchgeführt.

3.1 Ablauf der Messungen

Die Standardisierung der Messungen ist wichtig, um eine Vergleichbarkeit der Messreihen zu garantieren. Als Rahmenbedingung wurde festgelegt, dass der Patient nur liegend gemessen wird, um den Einfluss auf die Herzratenvariabilität durch die sonst gesteigerte Muskelaktivität zu minimieren. Außerdem wurde die Therapiezeit auf 20 Minuten begrenzt und im Durchschnitt mit einer Temperatur von 32 Grad Celsius und einem Volumen von 90 Litern durchgeführt. Ausnahmen werden im Auswertungsteil genauer erläutert. Die HSI-Messungen wurden kurz vor Therapiebeginn und nach Therapieende am lokalen Gewebe durchgeführt. Die HRV-Messung konnte über die komplette Therapiezeit verwendet werden. Während der Durchführung der Messungen wurde sich explizit gegen eine Langzeitmessung entschieden um vergleichbare Messwerte zu erhalten. Die Messzeitpunkte wurden so standardisiert, dass jeweils eine Messung vor, zwei Messungen während und eine Messung nach der Therapie durchgeführt wurde. Somit konnten dynamische Effekte während und ebenso nach der Therapie überprüft werden.

3.1.1 Messprinzip der HRV-Messung

Die Grundlage der HRV-Messung bildet die Messung eines artefaktfreien EKG's. Als Messwert werden die Abstände von zweier R-Zacken ermittelt (RR-Intervall), wie in Abbildung 6 abgebildet. Angenommen die Herzfrequenz beträgt 60 Schläge pro Minute, dann ergibt dies einen zeitlichen Abstand von 1000 ms von R-Zacke zu R-Zacke.

Somit sinkt der zeitliche Abstand zwischen den beiden RR-Intervallen bei Erhöhung der Pulsfrequenz und erhöht sich bei sinkender Frequenz.

Da sich die Pulsfrequenz stetig ändert, ergeben sich stets neue Werte für die RR-Intervalle, welche Rückschlüsse auf die autonome Funktion des Herzens geben. Eine Veränderung von über 100 ms von einem RR-Intervall zum nächsten gilt dabei als nicht pathologisch. [17]

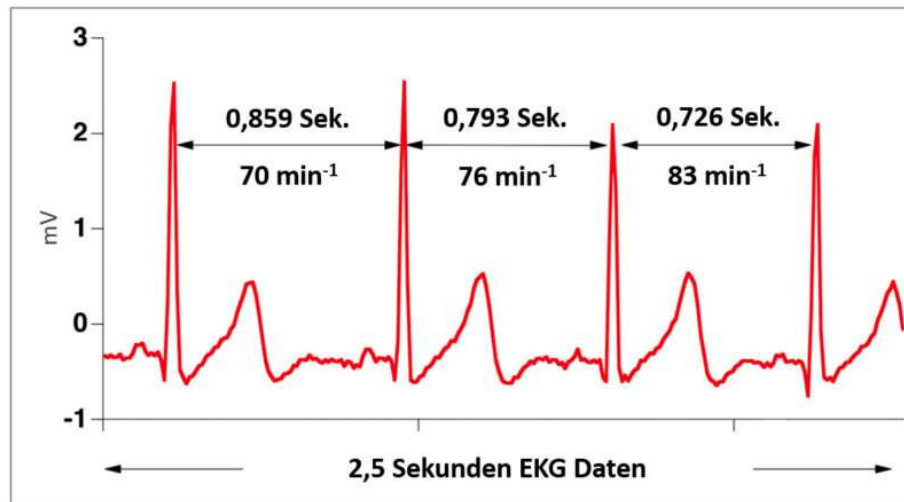


Abbildung 6: Beispiel HRV-Messung [21]

Bei den Untersuchungen wurde die Messung mit Hilfe des Messsystems der Firma „COMMIT GmbH“ durchgeführt, welches in Abbildung 7 dargestellt ist. Das System besteht aus einem Tablet und einem EKG-Brustgurt, welcher die Daten per Bluetooth an das Tablet übermittelt. Die Genauigkeit des Brustgurtes und der Auswertungssoftware wird durch eine Qualitätssicherung garantiert [22]. Die patentierte Applikation „VNS Analyse“ liefert im Anschluss die Auswertungsmöglichkeiten, die in Punkt 4.1 genauer erläutert werden. Um vergleichbare Messungen zu erzeugen, wurden die Messreihen jeweils mit 520 Herzschlägen durchgeführt. Je nach Herzfrequenz dauert eine Messung fünf bis zehn Minuten.



Abbildung 7 Messsystem der COMMIT GmbH [23]

3.1.2 Messprinzip der HSI-Messung

Die Hyperspektralanalyse nutzt Licht von verschiedenen Wellenlängen als Transportmedium, um Rückschlüsse auf Informationen im Gewebe zu geben.

Durch die verschiedenen Absorptionseigenschaften der Gewebsbestandteile, wird Licht in bestimmten Wellenlängen unterschiedlich remittiert. Dieses Licht wird anschließend über ein Beugungsgitter in einzelne Wellenlängen aufgespalten, durch einen optischen Sensor aufgenommen und nach Ort und Wellenlänge aufgelöst. Durch verschiedene Algorithmen werden die Daten ausgewertet und es lassen sich Informationen über die Gewebestruktur ablesen. Die Darstellung erfolgt im Anschluss über Falschfarbbilder.



Abbildung 8: TIVITA® Tissue Messung

Als Messgerät wurde das System TIVITA® Tissue der Firma „Diaspective Vision GmbH“ verwendet. Dieses verwendet Wellenlängen im Bereich von 500 bis 1000 nm und gibt Informationen über vier verschiedene Parameter aus [24]:

- Sauerstoffsättigung in oberflächlichen Gewebeschichten (StO_2)
- Perfusion in tieferen Gewebeschichten (NIR Perfusion Index)
- Hämoglobingehalt (THI)
- Wassergehalt (TWI)

3.2 Beispiele aus dem Praktikum

Die folgenden Beispiele sollen einen Einblick in die Messsysteme geben. Die konkrete Auswertung erfolgt im nachfolgenden Teilabschnitt 4. Auswertung.

3.2.1 Beispiel HRV-Messung

Bei dem ersten Beispiel handelt es sich um einen 20-jährigen Leistungssportler des FSV Zwickau, welcher durch eine Leistungsinsuffizienz aufgefallen ist und unter Verwendung der HRV-Analyse untersucht wurde. Die Untersuchung wurde während steigender und intensiver Belastung mit anschließender Behandlung der CO₂-Trockenbadtherapie durchgeführt. Dabei sollte überprüft werden, ob diese Insuffizienz in Ruhe oder in Belastung auftritt und welchen regenerativen Einfluss die Therapie besitzt.

Die erste Messung erfolgte in Ruhe ohne körperliche Belastung und wurde innerhalb von 30 Minuten gesteigert. Die maximale Belastung betrug dabei eine Geschwindigkeit von 18 km/h auf dem Laufband. Danach wurde eine zehn-minütige Erholungsphase durchgeführt, um im Anschluss die Therapie durchzuführen.

In Abbildung 9 sind die Messergebnisse zu den vorher beschriebenen Situationen dargestellt. Hier lässt sich der Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und veränderter Herzratenvariabilität gut aufzeigen.

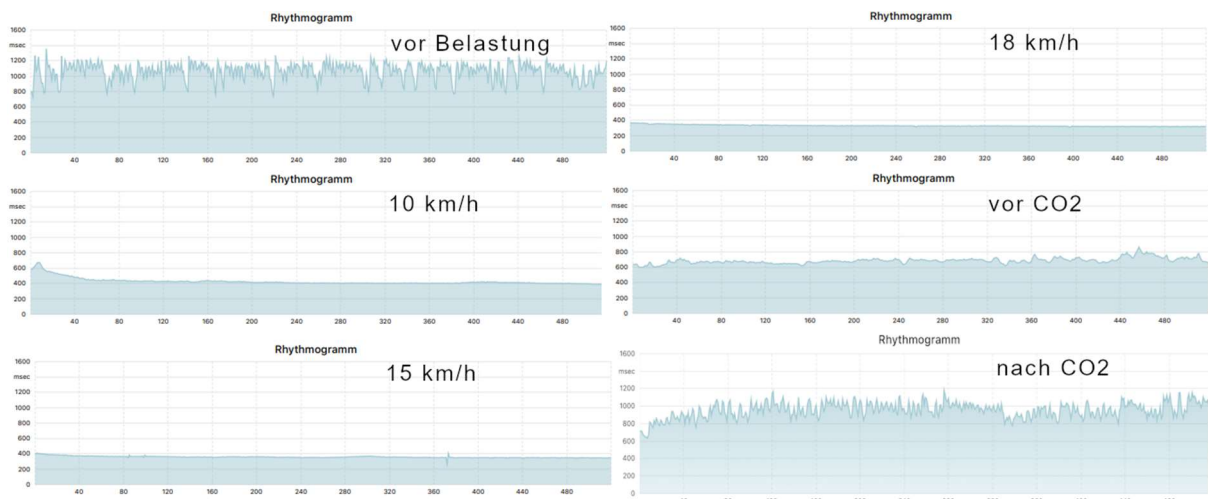


Abbildung 9: Rhythmogramm bei unterschiedlichen Belastungsstufen (Ordinate in ms, Abszisse in RR-Intervallen)

Während die Abstände der RR-Intervalle in Ruhe eine hohe Variabilität zeigen, ändert sich dieser Abstand bei Belastung kaum. Dadurch entsteht die geglättete Kurve bei 10, 15 und 18 km/h. Während der Erholungsphase vor der CO₂-Therapie nimmt diese Variabilität zu und ist nach der CO₂-Therapie auf einem ähnlichen Niveau wie vor der Belastung.

3.2.2 Beispiel HSI-Messung

Das zweite Beispiel zeigt einen 60-jährigen Patienten mit einer Weber-C-Fraktur des rechten Unterschenkels einen Tag nach der Operation.

In der Abbildung 10 sind rechts die vier Falschfarbbilder mit den jeweiligen Parametern und links oben das RGB-Bild abgebildet. Je stärker die Bilder im rechten Bereich rot eingefärbt sind, desto höher ist der jeweilige prozentuale Anteil oder Indexwert. Eine blaue Farbe signalisiert einen niedrigen Wert von 0 - 20 Prozent, Grün-Gelb einen Wert von 20 - 70 Prozent und Rot einen Wert über 70 Prozent.

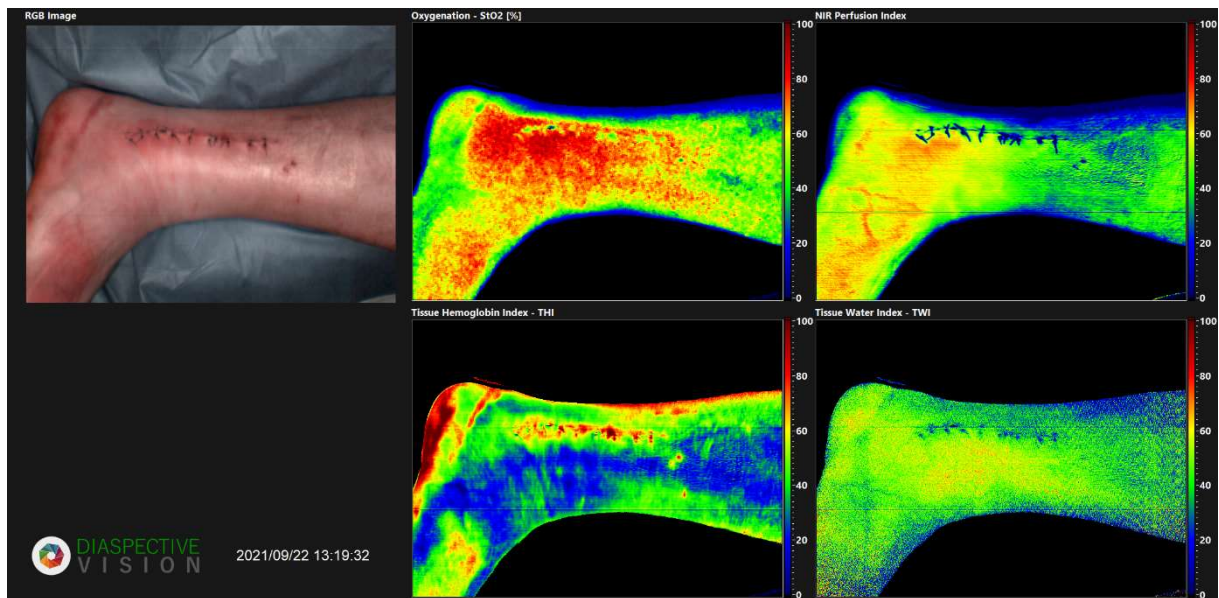


Abbildung 10: HSI Beispielmessung

Durch die vorherige Operation und der dadurch entstandenen Weichteilschädigung des Eingriffs sind noch entzündliche Prozesse zu erkennen. Diese zeichnen sich durch die erhöhte Sauerstoffsättigung (StO₂) und die gesteigerte Durchblutung (THI) aus.

4. Auswertung

4.1 HRV-Messung

Durch das komplexe System des vegetativen Nervensystems kann die Auswertung der HRV-Daten ähnlich komplex betrachtet werden. Neben den graphischen Darstellungen gibt es weitere Auswertungsmöglichkeiten. Im Wesentlichen wird in drei mathematisch-statistische Methoden unterschieden: Zeitbereichsparameter, Frequenzbereichsparameter und nicht-lineare Parameter. [25]

Graphische Darstellung

Rhythmogramm (Tachogramm)

Als einfache graphische Darstellung der Herzfrequenzvariabilität eignet sich das Rhythmogramm. Dabei werden die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen RR-Intervallen auf die Ordinate und die Anzahl der gemessenen Herzschläge auf die Abszisse aufgetragen.

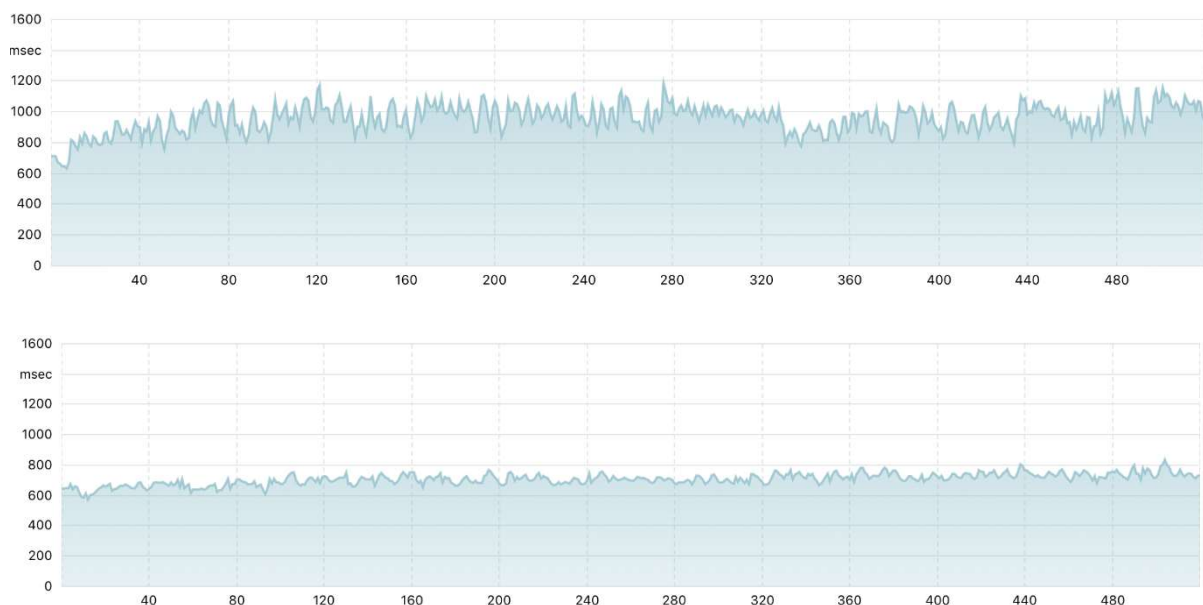


Abbildung 11: Rhythmogramm hohe (oben) und niedrige (unten) HRV (Ordinate in ms, Abszisse in Herzschläge)

Im Anschluss werden die einzelnen Messpunkte miteinander verbunden und es entsteht ein Liniendiagramm. Bei hohen Herzfrequenzen verschiebt sich die Kurve nach unten, da die Abstände zwischen jedem Herzschlag kürzer werden, während sich die Kurve bei niedriger Herzfrequenz nach oben verschiebt. Außerdem sind erste Rückschlüsse auf die Herzratenvariabilität zu erkennen, da bei höherer Variabilität die Abstände zwischen den RR-Intervallen stärker variieren und das Diagramm „zackiger“ wirkt. [23]

Histogramm

Eine weitere graphische Darstellungsform ist das Histogramm. Bei diesem werden die ermittelten RR-Intervalle in bestimmte Zeitbereiche eingeteilt (z. B. 750-800 ms; 800-850 ms) und als prozentuale Verteilungskurve dargestellt.

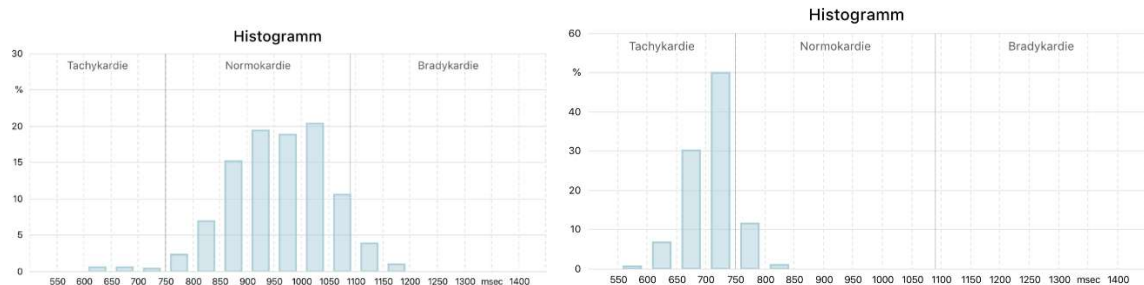


Abbildung 12: Beispiel Histogramm hohe (links) und niedrige (rechts) HRV

Bei guter Regulation ist die Fläche der Balken in der Breite größer und die Herzratenvariabilität ist demnach ebenfalls höher. Der Zeitbereichsparameter SI, der im Anschluss erläutert wird, nutzt dieses Diagramm, um einen quantitativen Wert über den sympathischen Einfluss zu geben. [23]

Poincaré-Plot

Ein drittes Auswertungsdiagramm ist ein Streudiagramm und wird im Bereich der HRV-Analyse auch als Poincaré-Plot bezeichnet. Die Punkte im Koordinatensystem ergeben sich aus zwei aufeinanderfolgenden RR-Intervallen. Der zeitliche Abstand zwischen den ersten beiden RR-Intervallen (RR1) wird über die X-Achse aufgetragen und der Wert zwischen dem zweiten und dritten RR-Intervall (RR2) wird über die Y-Achse aufgetragen. Der daraus entstehende Punkt wird im Diagramm aufgetragen. Dieser Vorgang wiederholt sich bis zum letzten Messintervall. Aus den aufgetragenen Punkten ergibt sich am Ende eine Punktwolke. Anhand von Abbildung 13 zeichnet sich eine hohe und niedrige Streuung ab. Dabei gilt je größer die Streuwolke ist, desto größer ist die Herzratenvariabilität. [23]

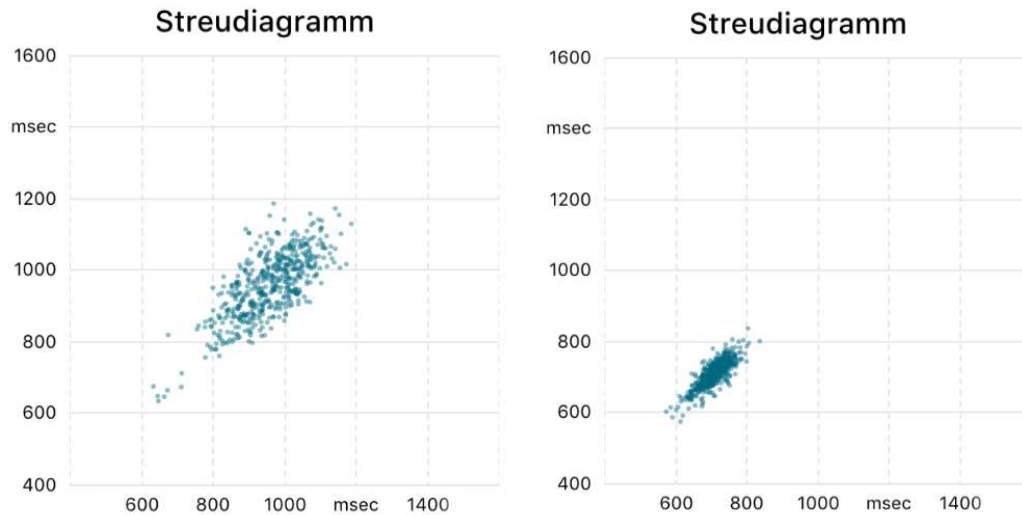


Abbildung 13: Beispiel Streudiagramm hohe (links) und niedrige (rechts) HRV

Zeitbereichsparameter

SDNN-Standard Deviation Normal to Normal

Beschreibt die Standardabweichung über alle gemessenen RR-Intervalle. Und wird mit Hilfe der Quadratwurzel aus der Varianz folgendermaßen berechnet:

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N (RR_i - \overline{RR})^2} \quad (2)$$

Der Parameter gibt Aufschluss über die Gesamtvariabilität und ist stark abhängig von der Herzfrequenz und der Länge des Messzeitraums. Er beschreibt den Einfluss von mehreren Faktoren, wie die der RSA, der Wärmeregulation und des Blutdrucks. [26]

RMSSD-Root Mean Square of Successive Differences

Wird auch als Kurzzeitvariabilität bezeichnet. Der Parameter wird durch die Quadratwurzel des quadrierten Mittelwertes der Summen aller Differenzen der benachbarten RR-Intervalle berechnet und lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2} \quad (3)$$

Durch diesen Wert ist ein quantitatives Vergleichen der kurzzeitigen RR-Intervall-Veränderungen möglich. Er ermöglicht somit Aussagen über das parasympathische Verhalten des vegetativen Nervensystems auf den Herzmuskel. Dabei gilt je höher der Wert, desto größer ist die parasympathische Aktivität. [27]

SI-Stressindex

Der als Stressindex bezeichnete Wert wird mit der bereitgestellten Software der Firma „COMMIT GmbH“ mitgeliefert. Der Wert ist ein Marker für die sympathische Aktivität des VNS und ist ein reiner Indexwert, der keine eigene Maßeinheit besitzt. Er setzt sich aus der Flächenberechnung der Herzfrequenzhistogramme zusammen und wird durch einen Zahlenwert beschrieben. Vereinfacht kann ausgesagt werden, je kleiner die Fläche des Histogramms ist, desto geringer ist der Zahlenwert des Stressindexes und somit auch die sympathische Aktivität. [23]

Die drei genannten Zeitbereichsparameter stellen nur eine Auswahl dar, die in dieser Arbeit zur Auswertung genutzt werden. Es besteht die Möglichkeit noch weitere Parameter zu betrachten, die aber meist mit den eben genannten korrelieren. Außerdem ist das Bestimmen von Normwerten nur aussagekräftig, wenn Alter, Geschlecht und Vorerkrankungen mit einbezogen werden. In der Auswertung ab Punkt 4.1.1 ff. wird somit nur auf die relative Änderung der Werte eingegangen.

Frequenzbereichsparameter

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit bildet die Analyse eines Frequenzspektrums und die daraus entstehenden Parameter.

Das Verfahren der Frequenzanalyse setzt hinreichend genaue Messdaten des Eingangssignals voraus, welches approximiert wird. Anschließend wird die Approximationsfunktion in die einzelnen Frequenzbestandteile zerlegt und graphisch dargestellt. Die unterschiedliche Verteilung des Frequenzspektrums gibt Aufschluss über die Aktivität des VNS.

In dem speziellen Fall der HRV-Frequenzanalyse muss auf bestimmte Voraussetzungen geachtet werden, um keine falschen Rückschlüsse aus den Ergebnissen ziehen zu können. Im Falle der hier verwendeten Fast-Fourier-Transformation, sollten ausreichend Datenpunkte, ein stationäres Signal und äquidistante Zeitachsen vorhanden sein. Das bedeutet, dass sich das Signal hinsichtlich der Herzfrequenz und des Zeitraums nicht ändern darf und die Messung von hinreichender Dauer ist. Die „Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology“ empfehlen mindestens 512 Datenpunkte bei einer Messung von 5 Minuten. [17, 25]

Die Frequenzanalyse der gemessenen Daten wurde mittels der MATLAB-Applikation „HRVTool by Marcus Vollmer“ durchgeführt. [28]

Neben den vorher genannten Parametern bietet sich bei der Applikation, die Möglichkeit eine Frequenzanalyse durchzuführen und Frequenzbereichsparameter zu ermitteln. Dies geschieht durch die Einteilung des Frequenzspektrums in drei verschiedene Bereiche und die anschließende Ermittlung der relativen Anteile am Gesamtspektrum. Die Einteilung erfolgt in einem Frequenzbereich von 0 bis 0,4 Hz.

VLf-Bereich (<0,04 Hz)

Der Bereich unter 0,04 Hz wird als sehr niedriger Frequenzbereich bezeichnet und ist ein Marker für hormonelle, vasomotorische und thermoregulatorische Einflüsse.

LF-Bereich (0,04- 0,15 Hz)

Als niederfrequenten Bereich wird das Frequenzspektrum von 0,04 - 0,15 Hz bezeichnet. Dieser gibt Informationen über die sympathische Aktivität des VNS. Außerdem gibt dieser Bereich Aufschlüsse über die barorezeptorische Aktivität, welche im Bereich von 0,1 Hz moduliert wird.

HF-Bereich (0,15- 0,4 Hz)

Der hochfrequente Bereich umfasst das Frequenzspektrum von 0,15 - 0,4 Hz. Dieser ist ein Marker für die parasympathische Aktivität des VNS und der Atmung.

HF/LF- Quotient

Dieser Parameter wird über das Verhältnis von hoch- und niederfrequenten Bereichen gebildet und gibt einen Überblick über die sympatho-vagale Balance oder Dysbalance. Dieser wird durch folgende Formel berechnet:

$$\frac{LF}{HF} \text{ ratio} = \frac{LF}{HF} = \frac{\int_{0,04 \text{ Hz}}^{0,15 \text{ Hz}} f(\lambda) d\lambda}{\int_{0,15 \text{ Hz}}^{0,4 \text{ Hz}} f(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

Die Funktion $f(\lambda)$ beschreibt dabei das Leistungsspektrum der RR-Intervall Frequenzanalyse.

Bei einem Wert deutlich über 1 lässt das auf einen sympathischen Einfluss des VNS schließen, da eine Verschiebung hinsichtlich der niederfrequenten Bereiche erfolgt. Während ein Wert von 1 eine Verschiebung in den hochfrequenten Bereich beschreibt. Dies schließt auf eine verstärkte parasympathische Wirkung des VNS und eine sympatho-vagale Balance besteht. [17, 29]

Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, erhöht sich der HF/LF-Quotient bei Belastung deutlich, während er sich in Ruhe bei ungefähr 1 befindet.

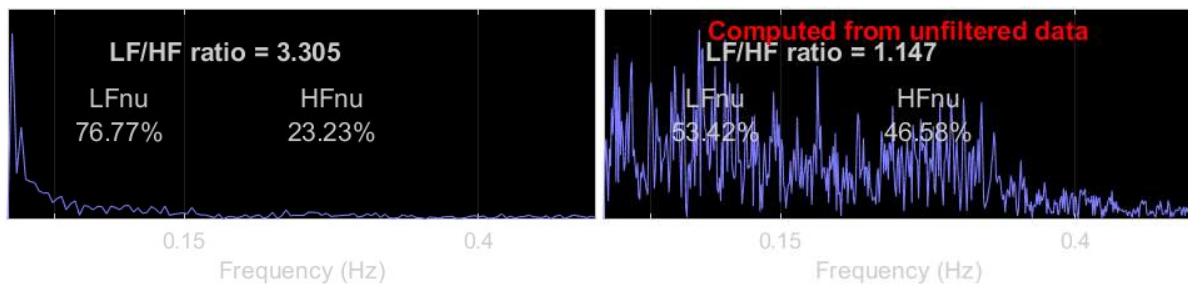


Abbildung 14: Frequenzspektrum bei Belastung (links) und in Ruhe (rechts)

Nicht-lineare Parameter

Ein nicht-linearer Parameter gibt Informationen über die qualitative Regulation des vegetativen Nervensystems. Ein Beispiel ist der Parameter Alpha1.

Alpha1

Der Wert Alpha1 wird durch die mitgelieferte Software der Firma „COMMIT GmbH“ berechnet und gibt Aussagen über das Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus. Die Berechnung erfolgt über die Nutzung von mathematischen Algorithmen der Harvard University, welche auf fraktaler Geometrie und der Chaostheorie beruhen. Einfach ausgedrückt, geschieht die Berechnung über die Auswertung des Rhythmogramms, in Bezug auf Ähnlichkeit des Signals. Bei hoher Selbstähnlichkeit des Signals, weist dies auf Kompensationsprozesse im Organismus hin. Im Gegensatz dazu weist eine geringe Ähnlichkeit oder auch „Chaos“ auf eine schlechte oder Fehlregulation hin, wie es z. B. bei Herzrhythmusstörungen der Fall ist. Die Angabe des Messwertes ist ohne Einheit und befindet sich in einem Bereich von 0 bis 2. Bei einer Kompensation des Systems erhöht sich der Wert und bei einer Fehlregulation wird der Wert niedriger. Der optimale Wert ist 1,0. [23]

Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, ändert sich der Alpha1 bei Formveränderung des Rhythmogramms. In der Mitte ist eine optimale Regulation des VNS abgebildet, während das untere Diagramm eine Kompensationsregulation und das obere eine leichte Fehlregulation aufzeigt.



Abbildung 15: Vergleich der Alpha1-Werte

4.1.1 Probandengruppen-Auswertung

Um einen allgemeinen Überblick zu verschaffen, ob und welche Auswirkungen die CO₂-Trockenbadtherapie auf das vegetative Nervensystem hat, werden die Werte SI, SDNN und RMSSD vor und nach der Therapie verglichen. In Tabelle 1 wird dargestellt, ob die Veränderung Δx der jeweiligen Parameter positiv oder negativ ausgefallen ist. Die gemessenen Rohdaten werden im Anhang B beigefügt.

Tabelle 1: Auswertung Veränderung nach Therapie

N=19	gesteigerter SI	reduzierter SI	gesteigerter RMSSD	reduzierter RMSSD	gesteigerter SDNN	reduzierter SDNN
	3	16	16	3	16	3

Unter den 19 Probanden weisen insgesamt 16 Personen entweder einen reduzierten Stressindex oder gesteigerten RMSSD bzw. SDNN auf. Die restlichen drei Personen zeigten eine gegensätzliche Reaktion auf, welche sich durch gesteigerten SI und reduzierten RMSSD bzw. SDNN auszeichneten. Bei Vergleichen der Probanden, die einen gesteigerten RMSSD und einen verminderten SI aufweisen kommt zeigen sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 2: Quantitative Veränderung der Zeitbereichsparameter

N=16	Δ SI in Punkten	Δ RMSSD in ms	Δ SDNN in ms
Mittelwert	63,65	12,72	14
Standardabweichung	51,25	15,99	20,11

Tabelle 2 beschreibt jeweils die negative Veränderung des SI in Punkten und die positive Veränderung des RMSSD und SDNN in Millisekunden. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Behandlung bei dem Großteil der Patienten eine gesteigerte parasympathische Aktivität hervorruft und die sympathische Aktivität sinken lässt.

4.1.2 Auswirkungen der Therapielänge

Die Untersuchungen wurden bei einer 20-jährigen Patientin mit einem CRPS im Stadium drei durchgeführt. Dieses Krankheitsbild, welches auch als Morbus Sudeck bezeichnet wird, zeichnet sich durch bestimmte Merkmale aus, die meist das vegetative Nervensystem beeinflussen (siehe 2.5). Es galt dabei zu überprüfen, ob die Therapielänge weitere Veränderungen der Herzratenvariabilität schafft und somit eine Veränderung in Rhythmogramm, Histogramm, Streudiagramm und den verschiedenen Parametern hervorruft.

Die Therapie wurde, bei dieser Patientin und dieser Versuchsreihe, lokal an der rechten Hand durchgeführt. Somit wurde mit Gasvolumina von 20 bis 25 Litern gearbeitet. Außerdem wurden beide Messreihen auf zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt.

20 Minuten Messung

Die Messreihe besteht aus insgesamt drei Messungen. Eine Messung vor der CO₂-Therapie, nach zehn Minuten während der Therapie und nach der Therapie. Die ermittelten Parameter werden in den folgenden Abbildungen gezeigt. Die dazugehörigen Diagramme werden in Anhang C beigelegt.

Anhand der Parameter in Abbildung 16 ist zu beobachten, dass die Patientin keine Einschränkungen hinsichtlich der Regulationsfähigkeit des VNS besitzt. Außerdem ist keine Übersteuerung des Sympathikus, welcher bei diesem Krankheitsbild zu erwarten war, bei einem SI-Wert von 22,8 Punkten zu erkennen. Das kann zum einen daran liegen, dass die Therapie schon seit mehreren Tagen angewendet wurde, als auch, dass die Patientin mit 20 Jahren eine deutlich bessere Regulationsfähigkeit besitzt, als Menschen in einem höheren Alter. Es zeigt sich jedoch eine leichte Überregulation des Parasympathikus (RMSSD) im Vergleich zum Sympathikus (SI), was sich durch den erhöhten Alpha1 auszeichnet, welcher mit 1,1 auf Kompensationsprozesse hindeutet.

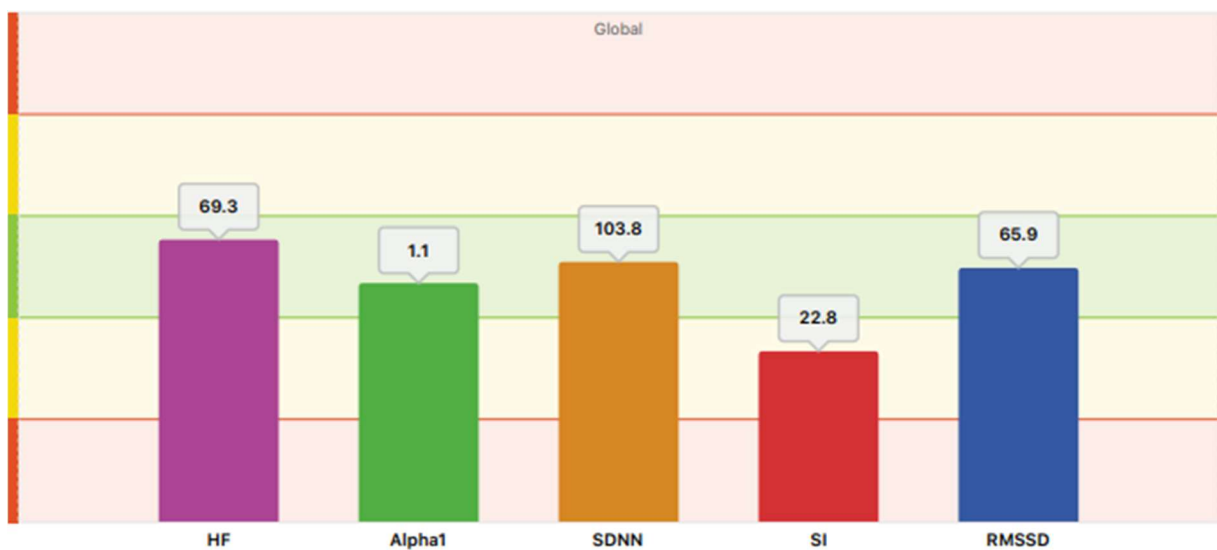


Abbildung 16: Parameter vor 20 Minuten CO₂-Therapie

Anhand des Pointcaré-Plots in Abbildung 43 ist im Vergleich zu der Messung vor der Therapie zu sehen, dass sich die Messwerte weniger stark unterscheiden. Damit ist gemeint, dass sich die Punkte im Streudiagramm zentrieren und der Anteil in einem bestimmten Frequenzbereich im Histogramm erhöht ist. Außerdem verschieben sich die Balken im Histogramm in Richtung Bradykardie. Diese Verschiebung ist im Rhythmogramm zu erkennen, bei einer Verschiebung der Werte auf 1000 ms. Die Struktur der Diagramme spiegelt sich auch in den Parametern wieder. Der Stressindex (SI) hat sich um über 20 Punkte gesteigert was auf eine gesteigerte sympathische Aktivität hindeutet. Die Parameter SDNN und RMSSD, die Marker für die parasympathische Aktivität sind, sinken dabei um 54,4 ms bzw 11,3 ms. Das zeigt sich auch durch den Alpha1 der mit einem Wert von 0,8 auf eine leichte Dysbalance zwischen Sympathikus und Parasympathikus hindeutet.

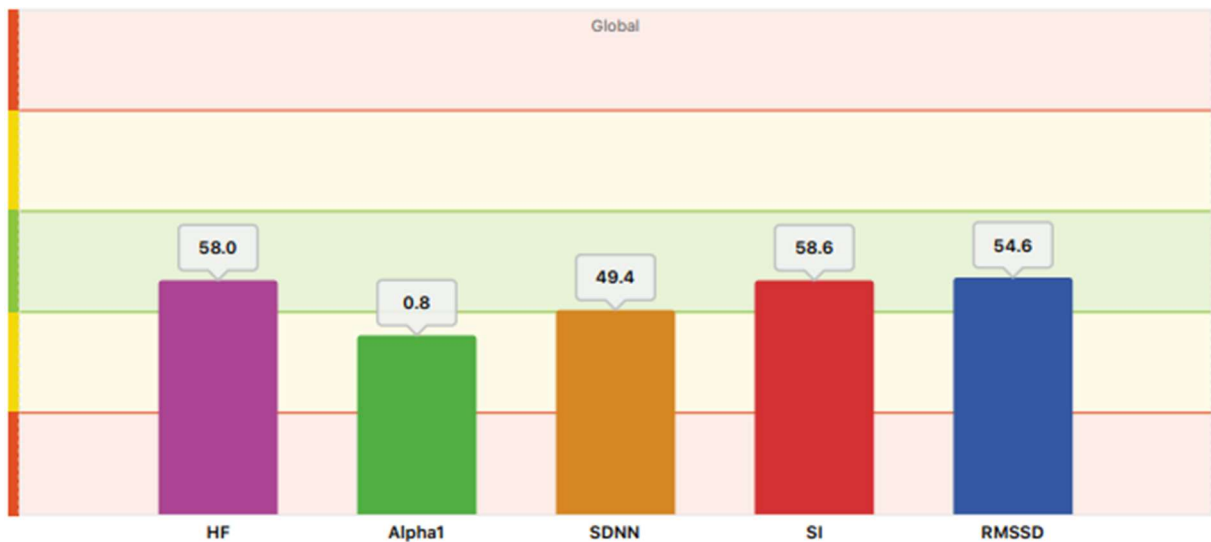


Abbildung 17: Parameter während 20 Minuten CO₂-Therapie (nach 10 Minuten)

Die dynamische Veränderung, welche im Rhythmogramm in Abbildung 43 während der Therapie zu verzeichnen war, bleibt nach der Therapie weiterhin bestehen. Das Histogramm in Abbildung 44 verschiebt sich minimal in Richtung der Normokardie und im Streudiagramm zentrieren sich die Punkte bei 1000 ms. Am Ende der Therapie steigen SDNN und RMSSD, im Vergleich zu der Messung während der Therapie, um 9,9 ms bzw. 5,8 ms und der Stressindex (SI) reduziert sich um 7,5 Punkte. Der Alpha1 erhöht sich auf 0,9 ist im Vergleich zum Therapiebeginn um 0,2 Punkte niedriger.

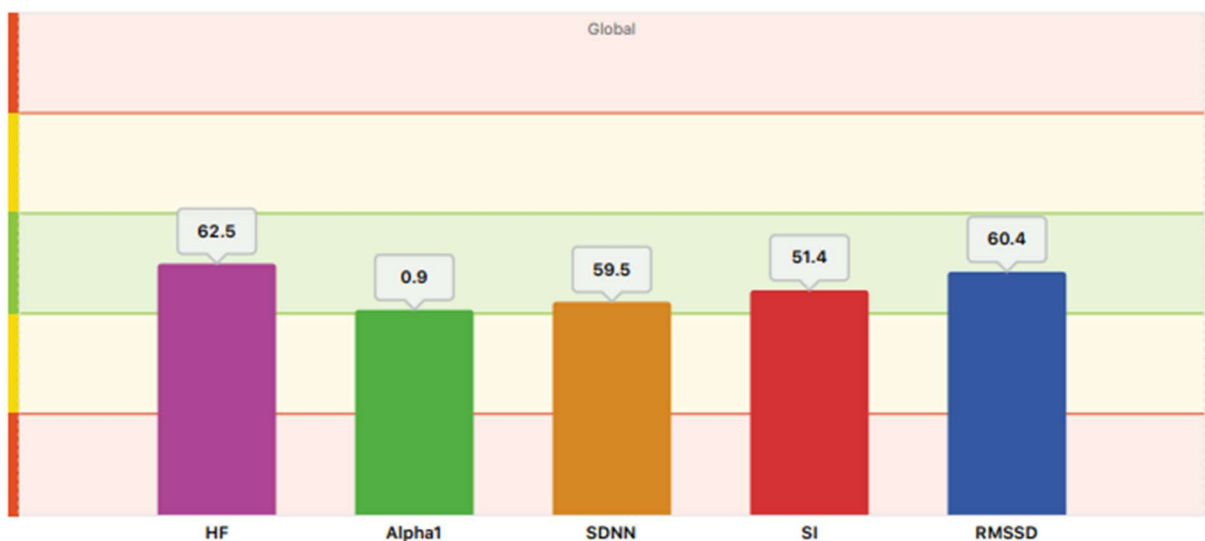


Abbildung 18: Parameter nach 20 Minuten CO₂-Therapie

40 Minuten Therapie

Bei dieser Messreihe wurden insgesamt fünf Messungen durchgeführt, da die Therapielänge weitere Messung während der Therapie zulässt. In den folgenden Abbildungen werden drei dieser Messungen ausgewertet.

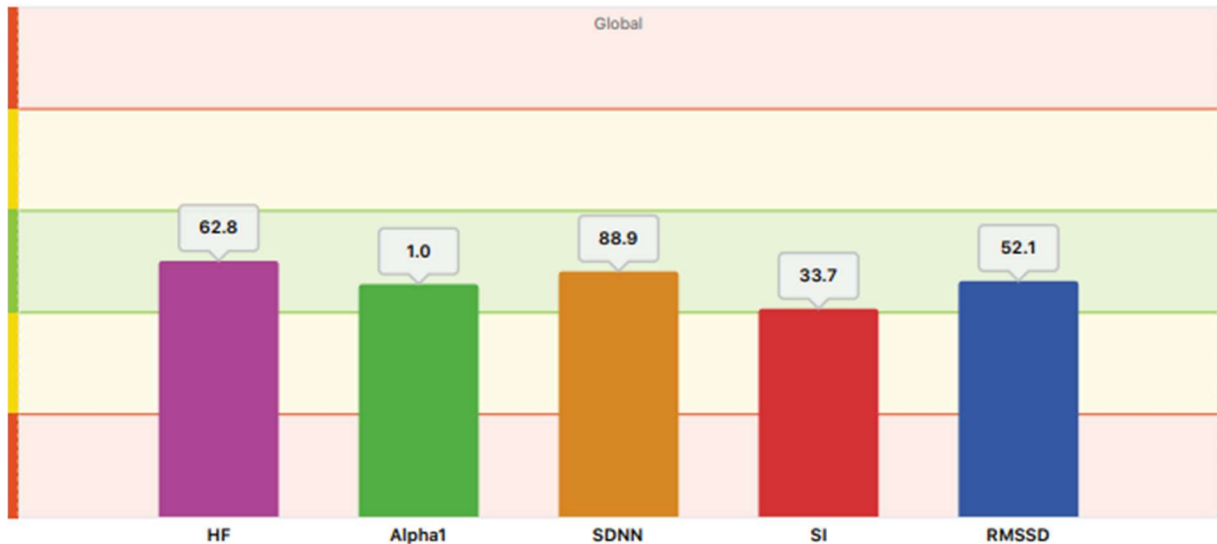


Abbildung 19: Parameter vor 40 Minuten CO₂-Therapie

Die Parameter spiegeln, wie schon vor der 20 Minuten Therapie, eine gute Regulation wider, da alle Parameter im Normbereich der Patientin liegen.

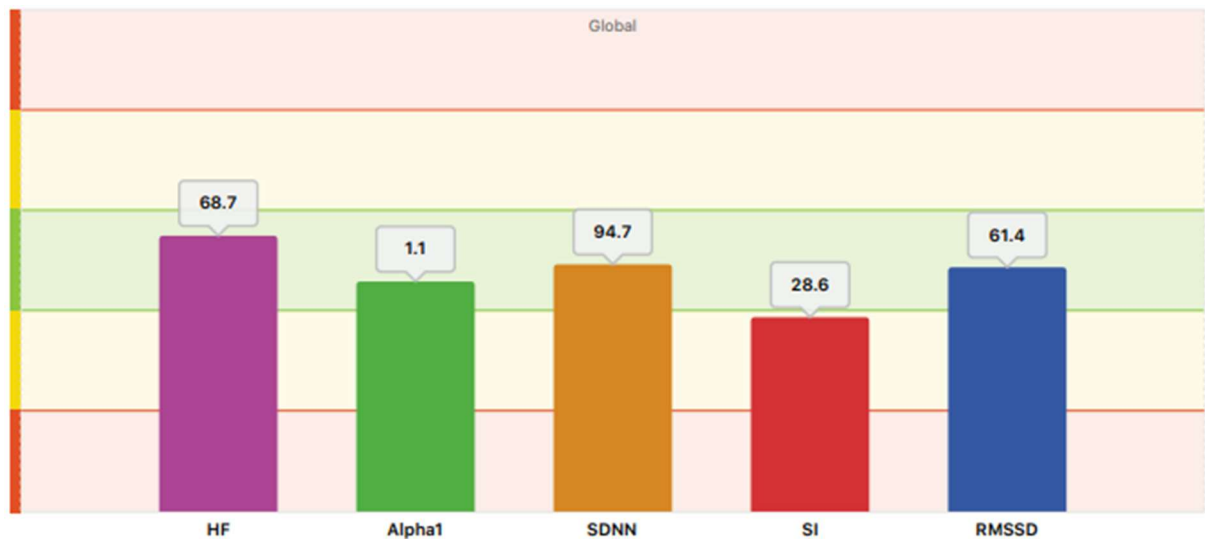


Abbildung 20: Parameter während 40 Minuten CO₂-Therapie (nach 30 Minuten)

Die Herzfrequenzbereiche weisen eine höhere Streuung im Vergleich mit der ersten Messung in Abbildung 45 auf, was im Streudiagramm durch eine höhere Streuung zu erkennen ist. Die

parasympathischen Indikatoren RMSSD und SDNN steigen jeweils um 9,3 ms bzw. 5,8 ms an. Der sympathische Indikator SI fällt um 5,1 Punkte. Jenes zeigt sich zusätzlich im Alpha1, welcher leicht auf 1,1 ansteigt.

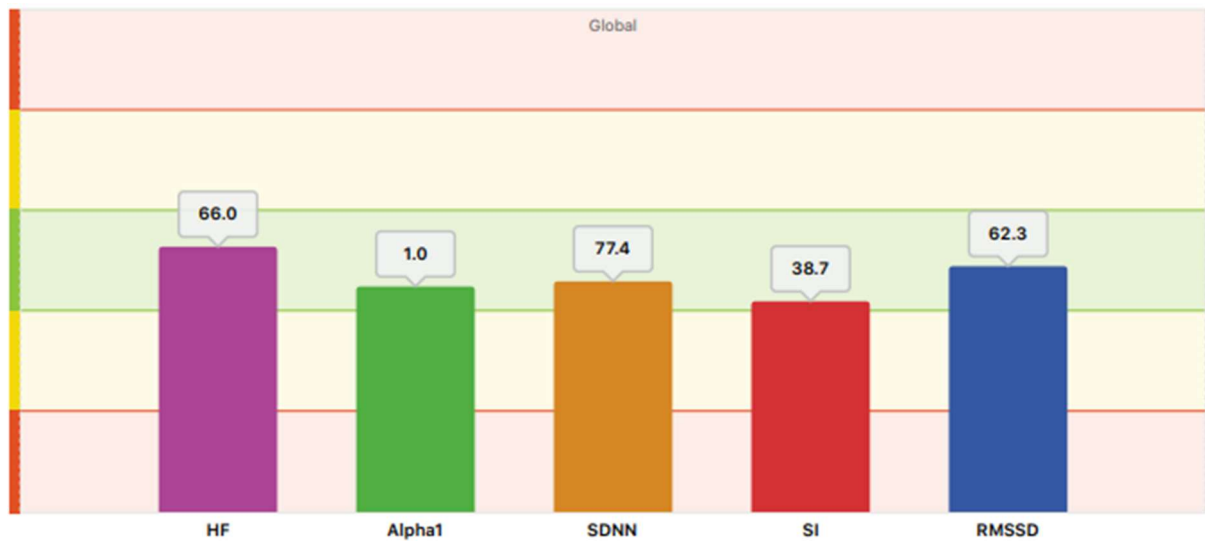


Abbildung 21: Parameter nach 40 Minuten CO₂-Therapie

Am Ende der 40 Minuten Therapie ist der RMSSD mit 62,3 ms höher, als vor und während der Therapie. Gleichzeitig sinkt der SDNN um 17,3 ms, welcher die Langzeitvariabilität beschreibt. Außerdem erhöht sich der Stressindex um 10,1 Punkte.

Zusammenfassung

Bei beiden Therapielängen ist eine Wirkung auf das vegetative Nervensystem zu beobachten. Bei Vergleich der beiden Messreihen waren jedoch gegensätzliche Wirkungen zu verzeichnen, was auf die Therapiezeitverlängerung bezogen werden kann. Weitere Einflussfaktoren wie der zirkadiane Rhythmus oder emotionale Verarbeitung sind jedoch nicht auszuschließen, weshalb mehr Messungen nötig sind, um fundierte Ergebnisse zu erhalten.

4.1.3 Vergleich der Teil- und Ganzkörpertherapie

Im Punkt 4.1.2 wurde bereits die Auswirkung der Therapielänge gezeigt. Die vorherigen Messreihen wurden dabei an einer Patientin durchgeführt, die sich auch bei dieser Messreihe zur Verfügung stellte.

Bei den folgenden Messungen sollte überprüft werden, welche Effekte die erhöhte Gewebsexposition des CO₂-Gases, bei gleicher Therapielänge hat. Die erste Messung wurde nur an der rechten Hand durchgeführt, während bei der zweiten Messung der komplette Körper, mit Ausnahme des Kopfes und des linken Armes, von CO₂-Gas exponiert wurde. Es wurden Gasvolumina im Bereich von 130 Litern bei der Ganzkörpertherapie benutzt und 25 Liter bei der Teilkörpertherapie. Die Therapiezeit betrug bei beiden Behandlungen jeweils 40 Minuten.

Teilkörpertherapie

Die Messungen der Teilkörpertherapie sind in Abbildung 19 bis Abbildung 21, sowie im Anhang C abgebildet und wurden im Abschnitt 4.1.2 ausgewertet.

Ganzkörpertherapie

Da die Therapiezeit bei dieser Messreihe erneut 40 Minuten beträgt wurden insgesamt fünf Messungen durchgeführt wobei drei ausgewertet wurden. Die Parameter werden in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die dazugehörigen Diagramme befinden sich in Anhang D.

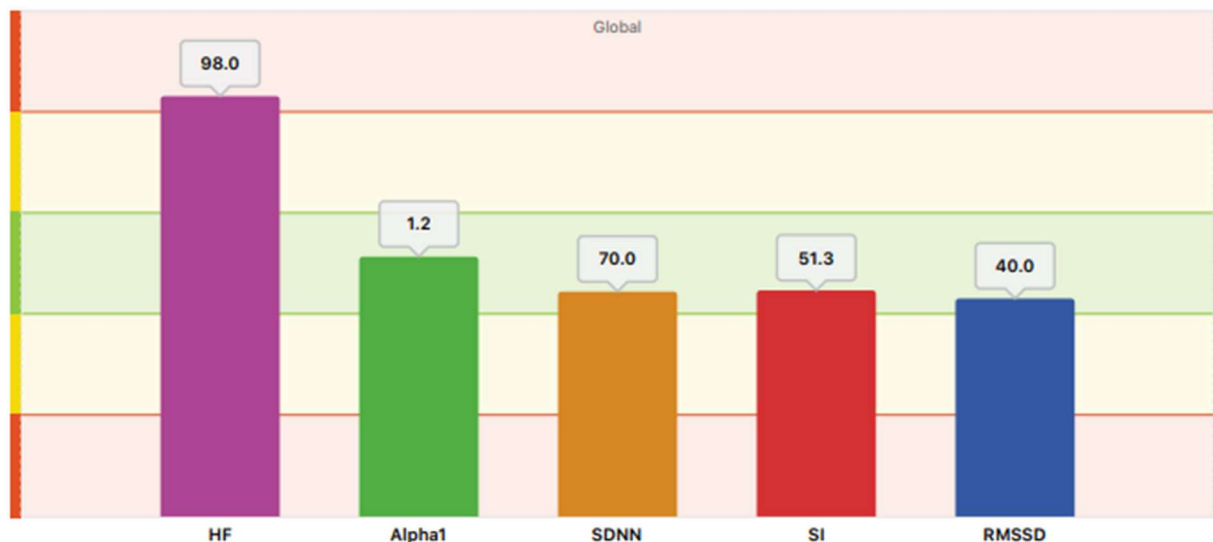


Abbildung 22: Parameter vor 40 Minuten CO₂-Ganzkörpertherapie

Bei der ersten Messung vor der Therapie hatte die Patientin einen leicht tachykarden Puls von 98, der möglicherweise durch Stress ausgelöst wurde, da während der Messung keine körperlichen Aktivitäten durchgeführt wurden. Es ist auch möglich das die Patientin durch eine

Veränderung des Therapieablaufs verunsichert wurde und sich das in einem steigenden Puls bemerkbar machte. Dies ist in den Diagrammen in Abbildung 49 ebenfalls zu erkennen. Im Histogramm sind die Balken in Richtung Tachykardie und im Streudiagramm im Vergleich mit den Diagrammen in Abbildung 48 in die linke untere Ecke verschoben.

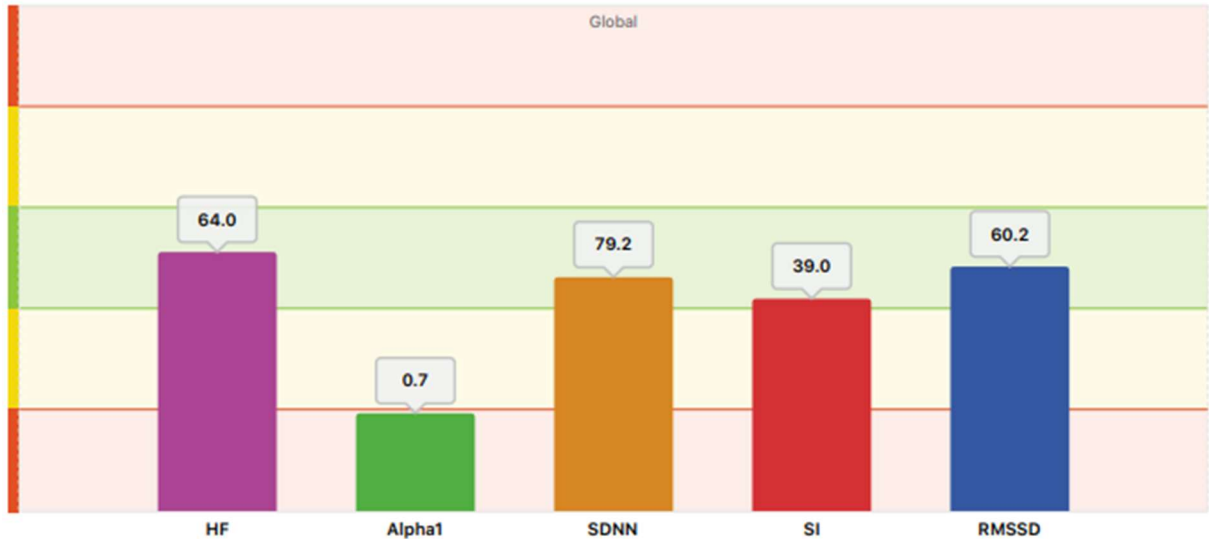


Abbildung 23: Parameter während CO₂-Ganzkörpertherapie (nach 30 Minuten)

Während der Therapie ist im Vergleich zum Beginn der Therapie zu erkennen, dass die parasympathischen Parameter RMSSD um 20,2 ms und SDNN um 9,2 ms ansteigen. Der SI sinkt um 12,3 Punkte. Eine Senkung des Alpha1 um 0,5 auf 0,7 deutet auf eine leichte sympatho-vagale Dysbalance hin

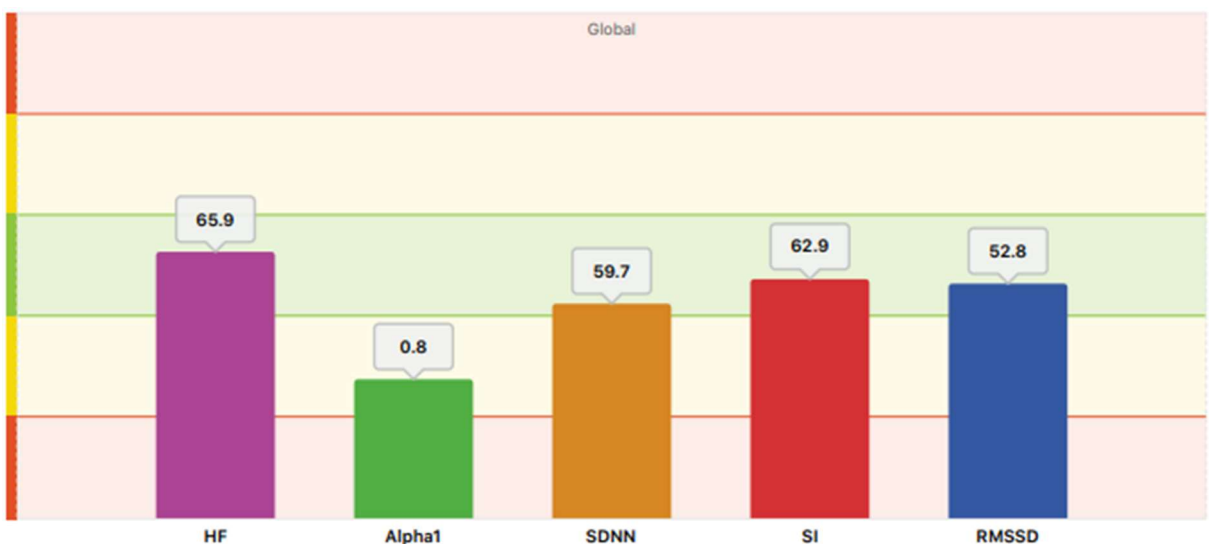


Abbildung 24: Parameter nach 40 Minuten Ganzkörpertherapie

Nach der Therapie steigt der Stressindex um 23,9 Punkte an. Die Parameter SDNN und RMSSD fallen leicht um 19,5 ms bzw. 7,7 ms, befinden sich aber auf einem höheren Niveau als vor der Therapie. Der Alpha1 steigt leicht an, ist aber mit 0,8 niedriger als vor der Therapie.

Zusammenfassung

Es zeigt sich bei beiden Behandlungen ein Effekt auf das vegetative Nervensystem. Die Ganzkörpertherapie weist gleichzeitig eine Steigerung der sympathischen Aktivität auf, was zu einer leichten Dysbalance im vegetativen Regelprozess geführt hat.

4.1.4 Placebo-Messung

Um eine bessere Aussagekraft zu schaffen, ob die CO₂-Therapie einen nachweisbaren Einfluss auf das vegetative Nervensystem hat, wurde überprüft ob durch den Wärmeeinfluss, den die Therapie mit sich bringt, eine ähnliche Änderung der Herzratenvariabilität hervorgerufen werden kann.

Um diesen Einfluss zu zeigen, wurden zwei Messungen an einem 22-jährigen Mann durchgeführt. Die erste Messung wurde mit dem erwärmten CO₂ durchgeführt und die Zweite mit erwärmter Atemluft. Um den zweiten Versuch zu ermöglichen, fand die Verwendung eines Föhns statt, welcher über eine Öffnung, am unteren Ende der Behandlungshülle, warme Luft in die Hülle beförderte. Im Anschluss wurde die Behandlungshülle am unteren Ende durch eine Klammer verschlossen und die Placebo-Therapie für 20 Minuten durchgeführt. Die verwendeten Materialien sind in Abbildung 25 abgebildet.



Abbildung 25: verwendete Materialien während der Placebo- Messung

Die Temperatur wurde mit Hilfe eines Temperaturmessgerätes bei beiden Versuchen über den Therapiezeitraum ermittelt und als Diagramm in Abbildung 26 dargestellt.

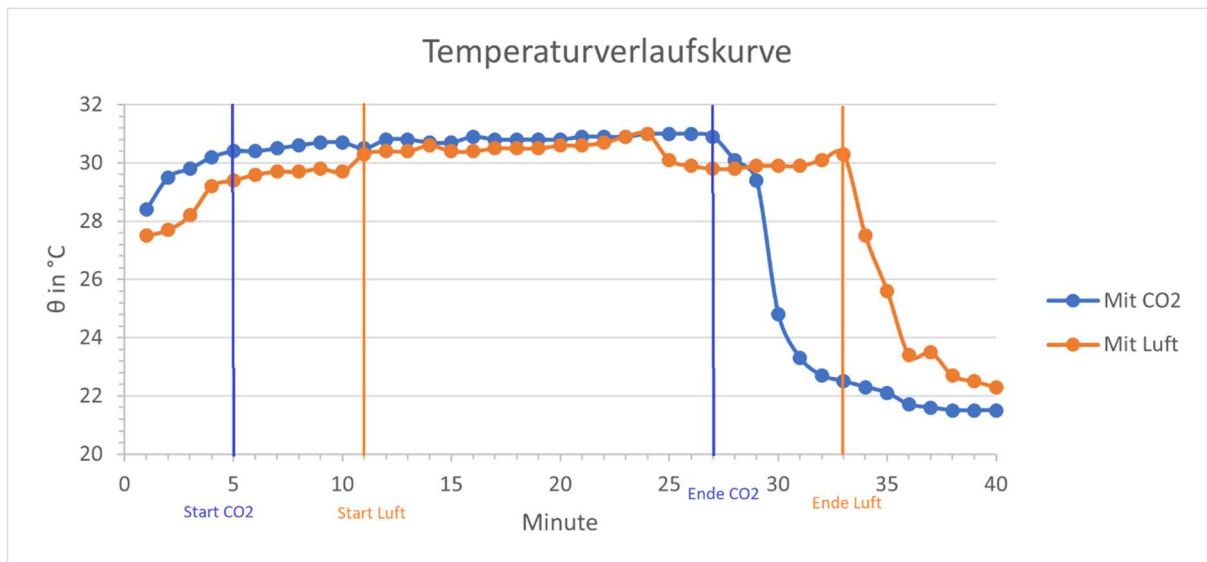


Abbildung 26: Temperaturverlaufskurve bei Messreihe mit Atemluft und CO₂

Anhand der Temperaturkurve ist zu erkennen, dass sich die maximalen Temperaturen während der Therapie bei ca. 31 Grad Celsius einpegeln. Der spätere Einbruch der Temperatur, in der Verlaufskurve, ist durch das Evakuieren der Behandlungshülle am Ende der Therapie zu erklären. Aufgrund der unterschiedlichen Startzeiten der Therapie, ist dieser Einbruch in der Temperaturkurve um sechs Minuten verschoben, wie anhand der blauen und orangen Markierungen in Abbildung 26 zu erkennen ist. Außerdem ist ein geringes Absinken der Temperatur auf 30 Grad Celsius bei der Placebo-Messreihe mit Luft zu beobachten, da die Behandlungshülle kurzzeitig undicht war. In den Abbildung 27 bis Abbildung 32 werden die Messergebnisse der Messreihen dargestellt. Die dazugehörigen Diagramme werden im Anhang E beigefügt.

Zu Beginn der Therapie hat der 22-jährige Proband eine Herzfrequenz im Normbereich. Der Alpha1 befindet sich mit 1,0 im optimalen Bereich. Die parasympathischen Parameter SDNN und RMSSD sind mit 91,9 ms und 61,2 ms ebenso im normalen Bereich. Der SI ist mit 27,5 Punkten leicht unter den optimalen Bereich. Das Rhythmogramm in Abbildung 51 weist ab 280 Herzschlägen Veränderungen in der Dynamik auf, was auf verschiedene Einflüsse wie kleine Bewegungen oder emotionale Verarbeitung schließen lässt.

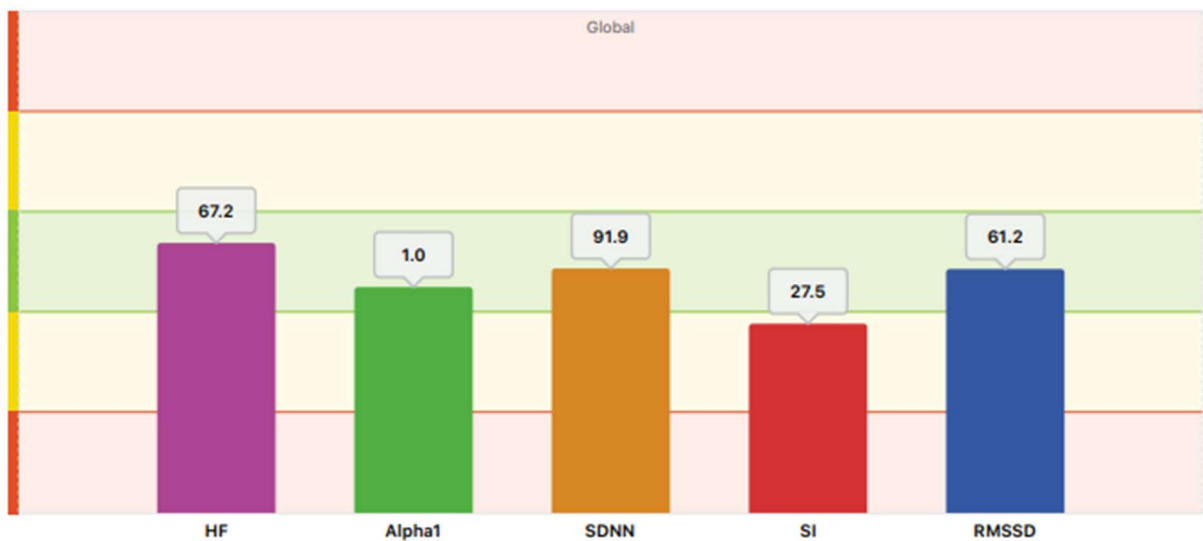


Abbildung 27: Parameter vor CO₂ Therapie

Auch bei diesem Probanden sind ähnliche Effekte zu beobachten, die schon in den vorherigen Teilabschnitten beschrieben wurden. Der RMSSD steigt um 10 ms an, während der SI um 2,1 Punkte fällt. Außerdem steigert sich die Langzeitvariabilität SDNN um 5 ms. Im Histogramm in Abbildung 52 ist eine Verschiebung zur Bradykardie hin zu verzeichnen. Jenes spiegelt sich auch im Streudiagramm wieder, da eine Verschiebung in die rechte obere Ecke zu erkennen ist. Außerdem verstärkt sich die Streuung.

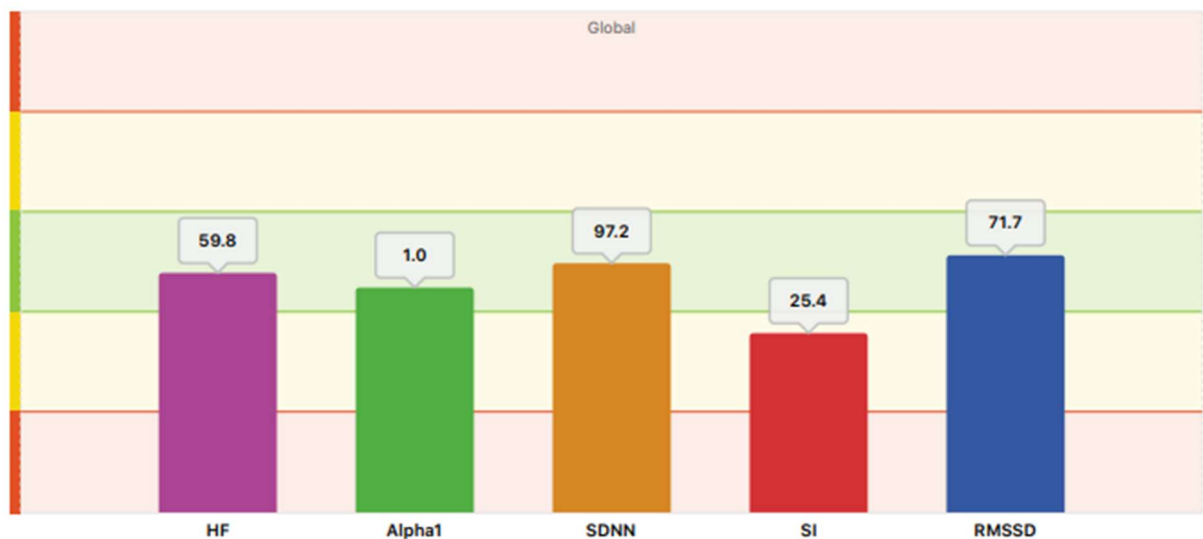


Abbildung 28: Parameter während CO₂-Therapie (20 Minuten)

Die Herzfrequenz sinkt nach der Therapie auf 56 ab. Der SI verringert sich um 1,2 Punkte. Außerdem fällt der Alpha1 auf 0,7 ab was auf Kompensationsprozesse hindeutet. Die Langzeitvariabilität sinkt auf 83,2 ms ab. Im Gegensatz dazu, befindet sich der RMSSD mit

76,1 ms auf dem höchsten Niveau, bei Vergleich mit den beiden vorherigen Messungen. Eine Steigerung der parasympathischen Aktivität durch die Therapie konnte somit auch bei dieser Messung gezeigt werden.

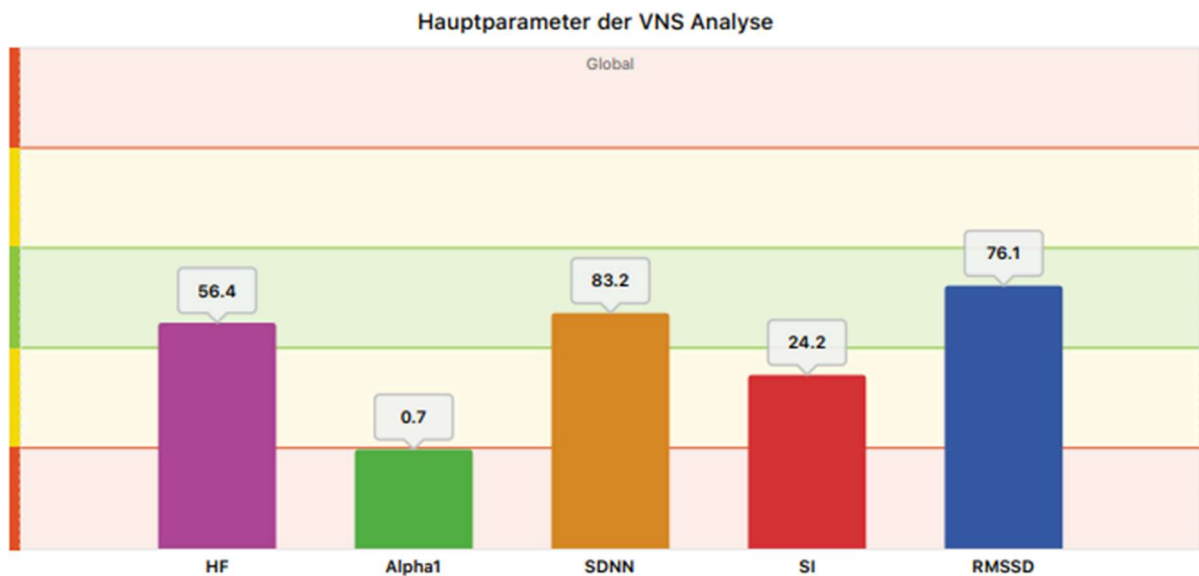


Abbildung 29: Parameter nach CO₂-Therapie

Die Messung vor Beginn der Placebo-Therapie zeigt einen erhöhten RMSSD von 89,5 ms und einen SDNN von 109,8 ms, welcher auf eine Übersteuerung des Parasympathikus hindeutet. Der Stressindex befindet sich mit 22,4 Punkten auf einem niedrigen Niveau. Diese Ungleichheit der beiden Gegenspieler zeigt sich im Alpha1 mit einem Wert von 0,8.

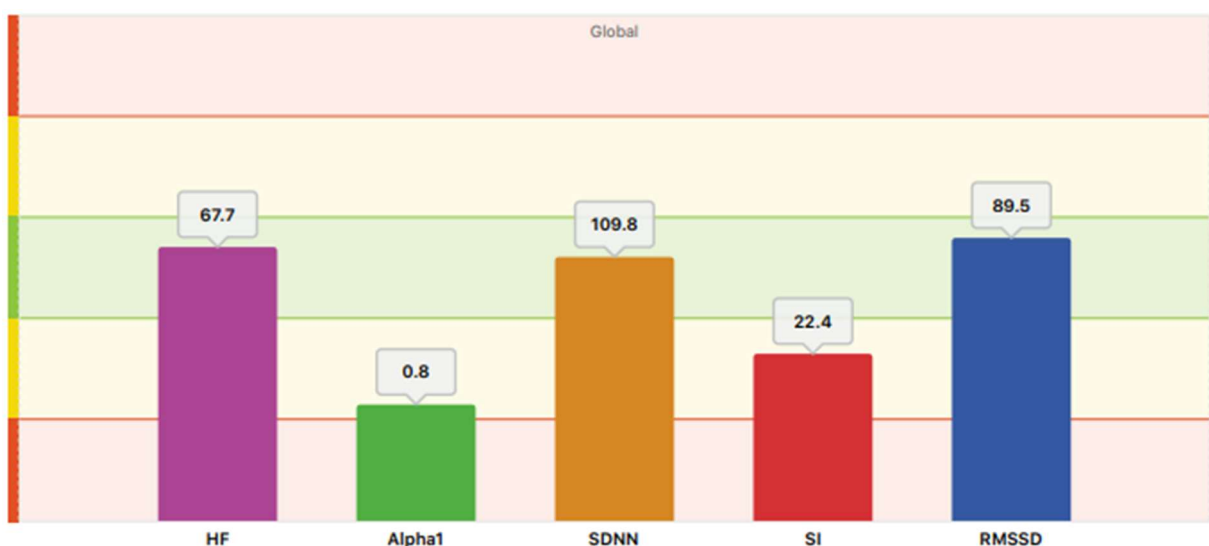


Abbildung 30: Parameter vor Placebo-Messung

Während der Placebo-Therapie sinkt der RMSSD um 21,1 ms ab. Der SDNN sinkt leicht um 6,8 ms, während der SI um 1,8 Punkte ansteigt. Der Alpha1 bleibt dabei auf dem Niveau von 0,8.

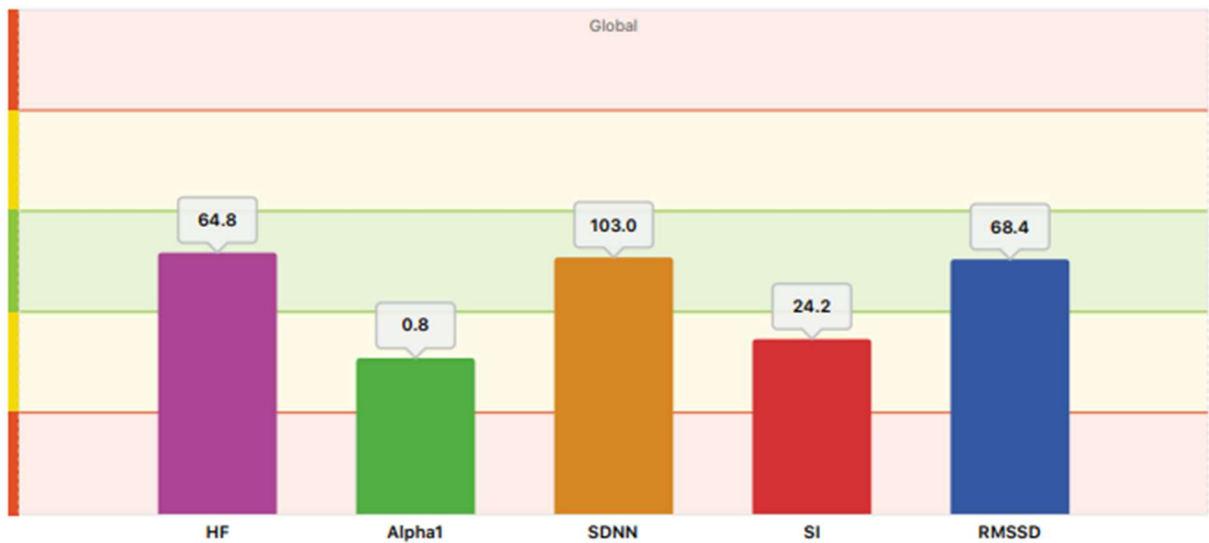


Abbildung 31: Parameter während Placebo-Messung

Am Ende der Therapie ist der RMSSD auf dem niedrigsten Niveau mit 58,6 ms. Der SI befindet sich hingegen auf dem Höchsten mit 60,9 Punkten. Eine Reduzierung des SDNN um 39,6 ms schließt auf eine geringere parasympathische Aktivität.

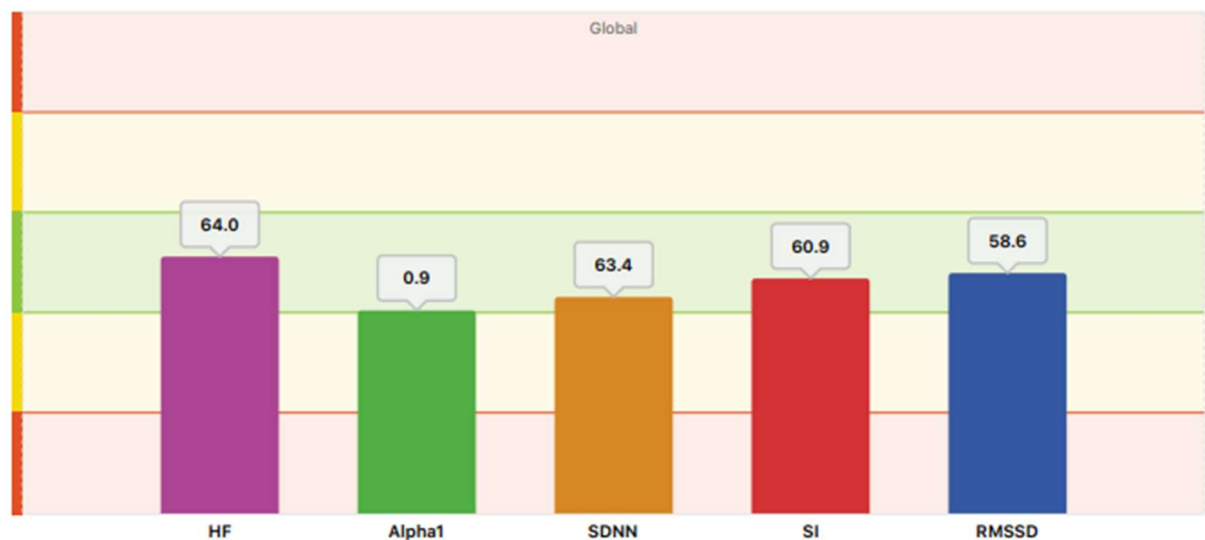


Abbildung 32: Parameter nach Placebo-Messung

Zusammenfassung

Die Messung während der CO₂-Therapie zeigt eine verstärkende parasympathische Wirkung, im Gegensatz wies die Placebo-Messung eine Reduzierung des Parasympathikus und Verstärkung des Sympathikus auf.

4.2 HSI-Messung

4.2.1 Lokale Wirkung

Um die lokale Wirkung der Therapie zu überprüfen, wurden die HSI-Messungen jeweils kurz vor und nach der Therapie an der behandelten Körperregion durchgeführt. Die Messungen dienen dazu, die bisherigen Erkenntnisse, die durch vorherige Untersuchungen entstanden sind, zu festigen und belegen zu können.

Die bisherigen nachweisbaren Effekte sind eine verbesserte Durchblutung, und die damit verbundene erhöhte Oxygenierung im peripheren Gewebe hervorgerufen durch den „Bohr-Effekt“ (siehe 2.2.3). [3, 4] Die Messung wurde an der gleichen Versuchsperson wie in 4.1.4 durchgeführt.

Wie anhand der Abbildung 33 zu erkennen ist, steigt der Tissue Hämoglobin Index, welcher ein Indikator für die Durchblutung im Gewebe ist, nach der Therapie signifikant an. Dies führt außerdem zu einer erhöhten Oxygenierung, welche sich im Falschfarbbild abzeichnet.

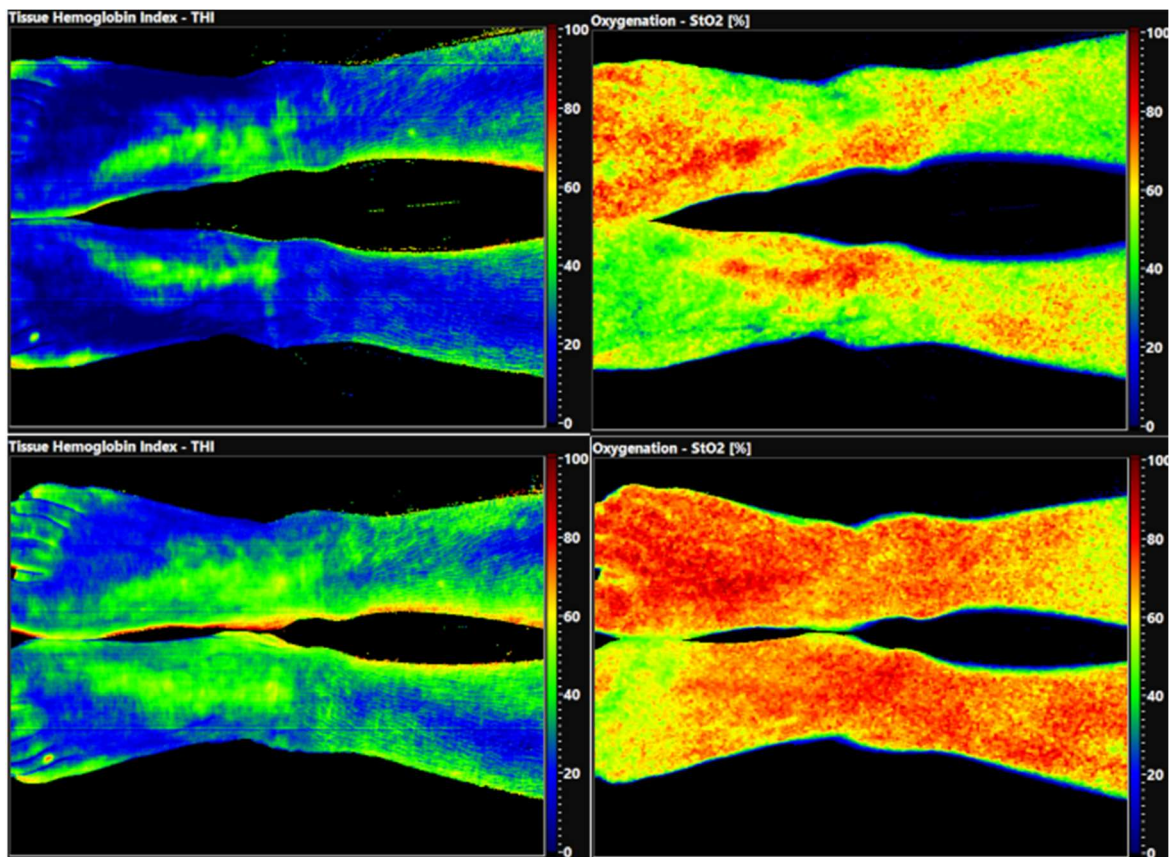


Abbildung 33: Durchblutung (links) und Sauerstoffsättigung (rechts) vor (oben) und nach (unten) der Therapie

4.2.2 Systemische Wirkung

Die systemische Wirkung beschreibt welchen Einfluss eine lokale Anwendung auf den kompletten Organismus hat. Um diese Wirkung zu überprüfen, wurden HSI-Messungen an der linken Hand durchgeführt. Der Vorteil bei dieser Messreihe war, dass die Messungen alle zwei Minuten bei laufender Therapie durchgeführt werden konnte, um dynamische Veränderungen festzustellen. Die vollständige Messreihe ist im Anhang F beigefügt. Im Folgenden werden die Messungen anhand Abbildung 34 und Abbildung 35 vor und nach der Therapie verglichen.

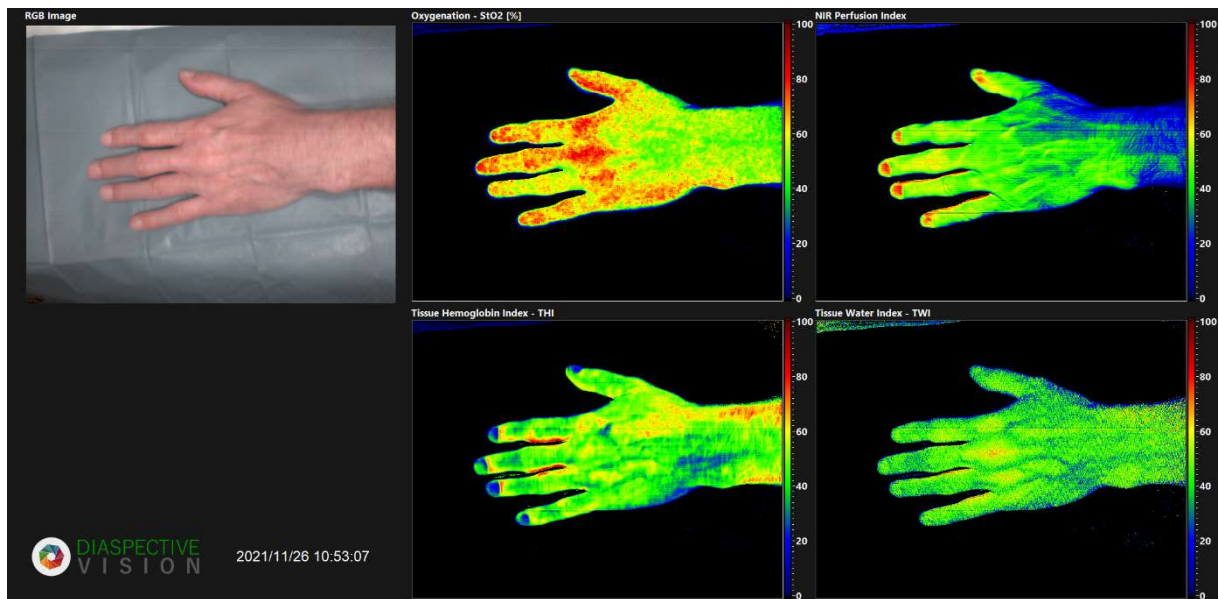


Abbildung 34: HSI-Messung systemische Wirkung vor Therapie

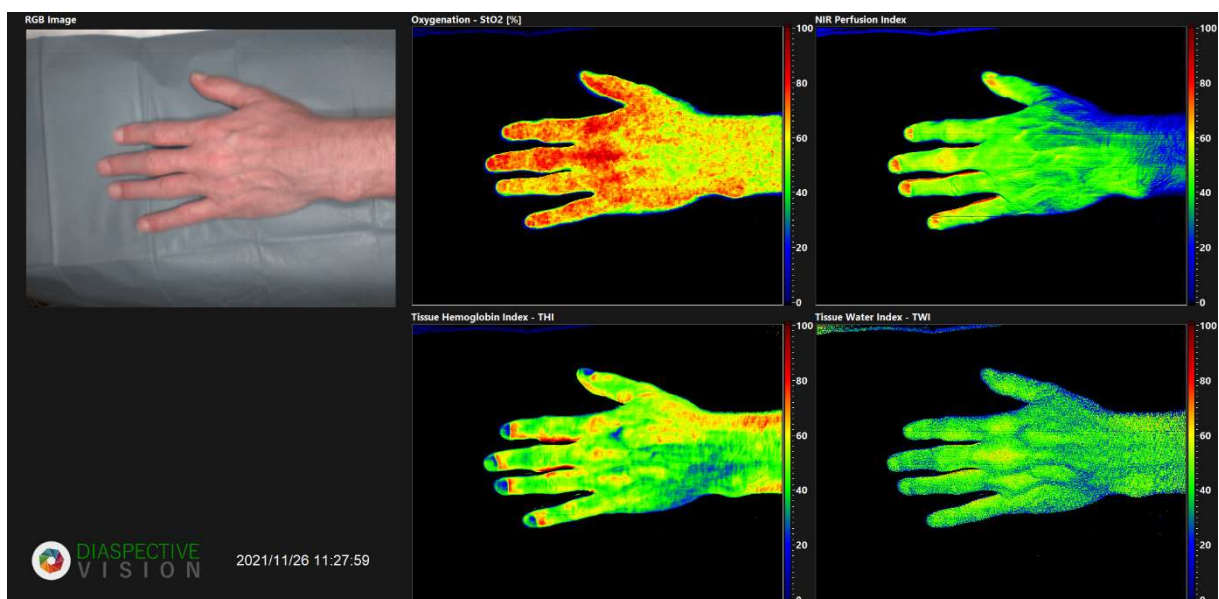


Abbildung 35: HSI-Messung systemische Wirkung nach Therapie

Die größten Unterschiede sind in der gesteigerten Durchblutung (THI) und die daraus folgende gesteigerte Oxygenierung (StO₂) des Gewebes zu erkennen. Die Ergebnisse bisheriger Messungen konnten somit bestätigt werden.

4.2.3 Therapieoptimierung

Ziel der Therapieoptimierung ist es, durch Feuchtigkeitserhöhung im Gewebe, durch bestimmte Lotionen, ein besseres Diffundieren des CO₂ zu ermöglichen. Bei den Messreihen standen zwei Cremes zu Verfügung. Zum einen die „CeraVe Feuchtigkeitslotion“ und zum anderen „CeraVe SA Urea glättende Feuchtigkeitscreme“. Beide Lotionen wurden zwei Stunden vor Behandlung auf den Unterschenkel aufgetragen. Danach wurden jeweils Messungen mit den Lotionen durchgeführt und mit der Messung ohne Feuchtigkeitslotionen verglichen. Da bei bisherigen Messungen der größte Unterschied in der Gewebssauerstoffsättigung zu erkennen war, wurde nur dieser Parameter verglichen.

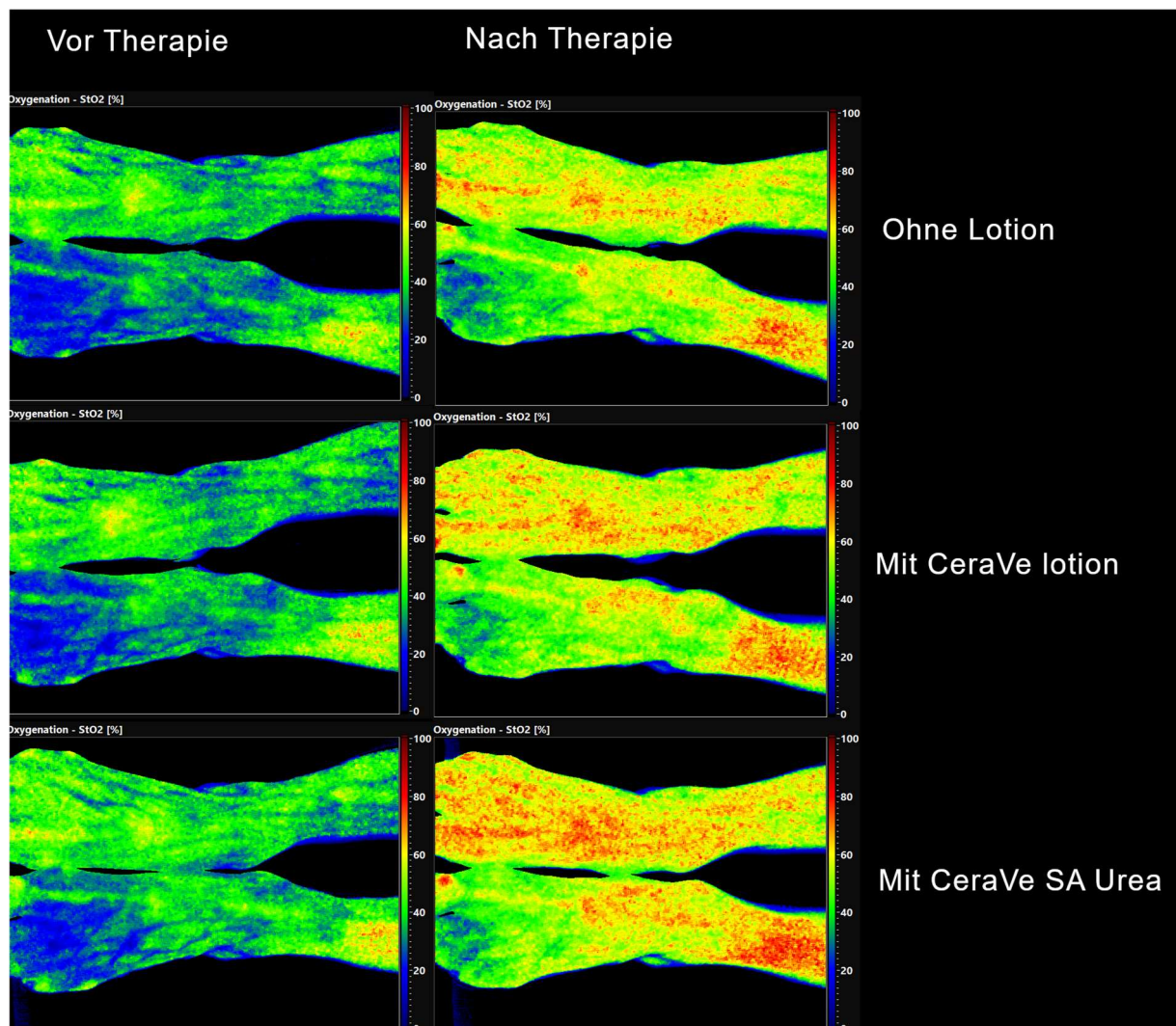


Abbildung 36: Oxygenierung bei verschiedenen Lotionen

Anhand der Abbildung 36 ist zu erkennen, dass die Feuchtigkeit der Haut einen Einfluss auf das Einwirken des Gases hat und somit auch die Wirkung auf die Sauerstoffsättigung im Gewebe. Auch wenn die Sauerstoffsättigung der untersten Messung vor der Therapie schon prozentual höher ist als bei den anderen beiden Messungen, lässt sich nach der Therapie eine stärkere Steigerung der Oxygenierung messen. Das bedeutet, dass beide Lotionen eine ähnliche Wirkung erzeugen können.

4.2.4 Placebo-Messung

Wie schon in Abschnitt 4.1.4 sollte die lokale Wirkung der Gewebsoxygenierung mit Hilfe einer Placebo-Messung überprüft werden. Dabei sollte gefestigt werden, dass die gezeigten Effekte hauptsächlich auf die Wirkung des CO₂ zurückzuführen sind und nicht auf die gefäßerweiternde Wirkung durch den Wärmeinfluss der Therapie.

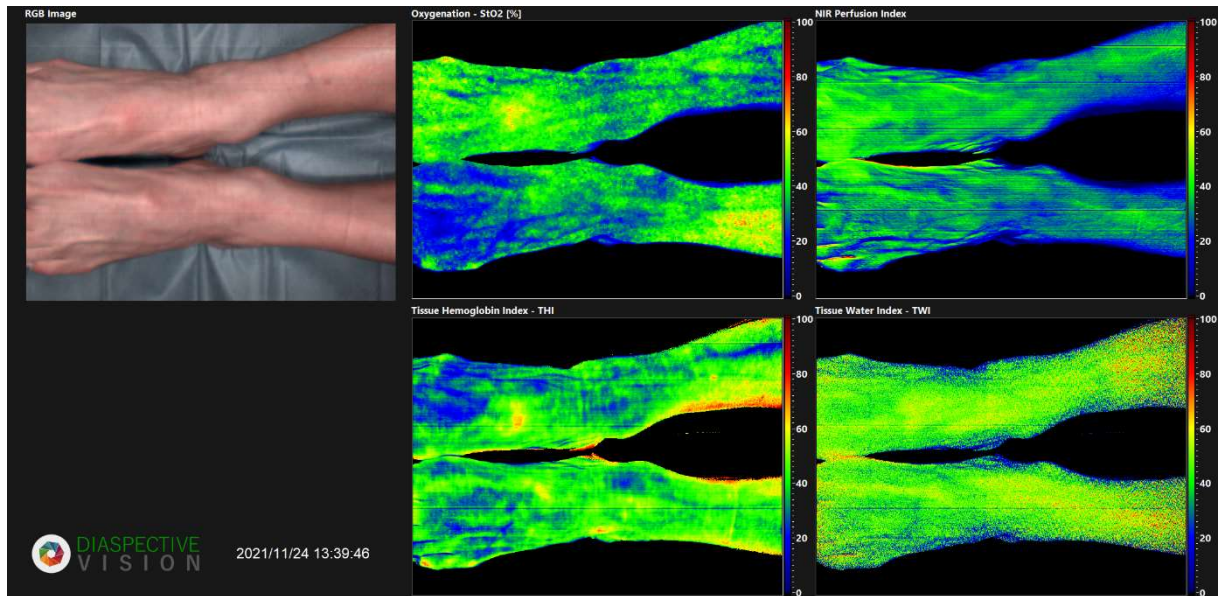


Abbildung 37: HSI-Messung vor CO₂-Therapie

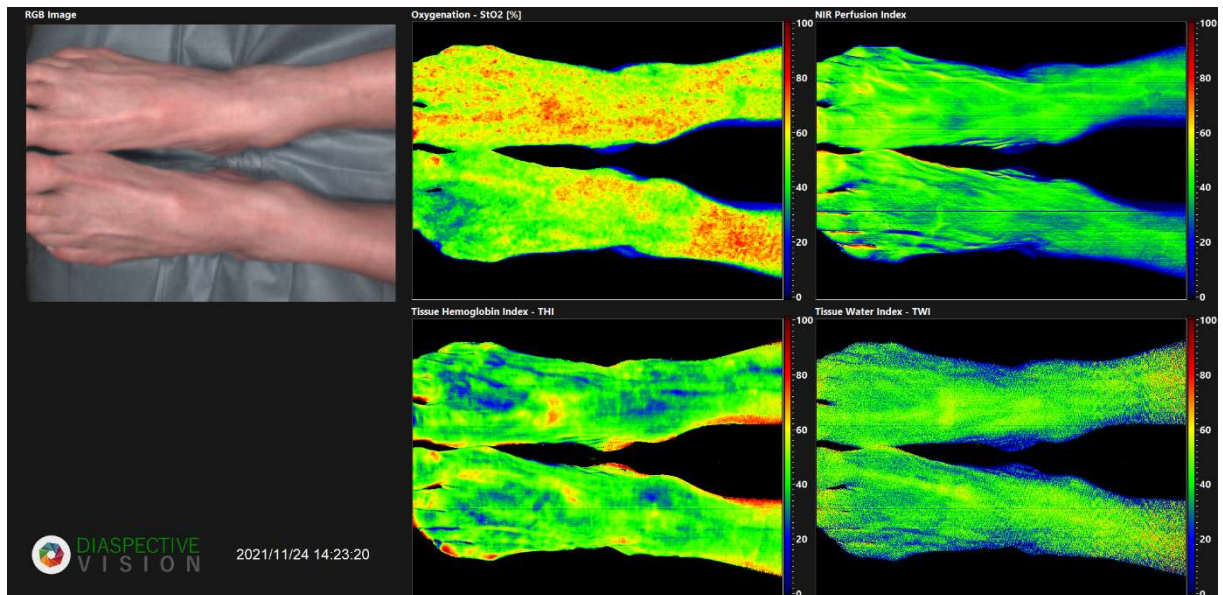


Abbildung 38: HSI- Messung nach CO₂-Therapie

Wie in den bisherigen Messungen vor und nach der Therapie ist eine Erhöhung der Durchblutung und eine gesteigerter Oxygenierung, sowie eine höhere Gewebspfusion zu erkennen.

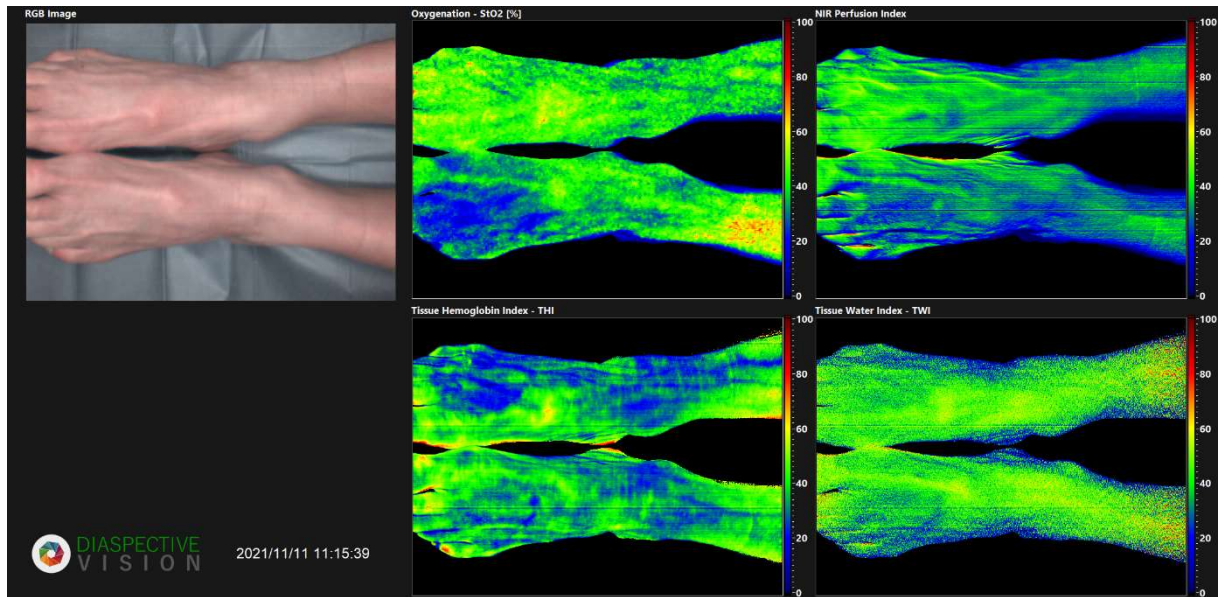


Abbildung 39: HSI-Messung vor Placebo-Therapie

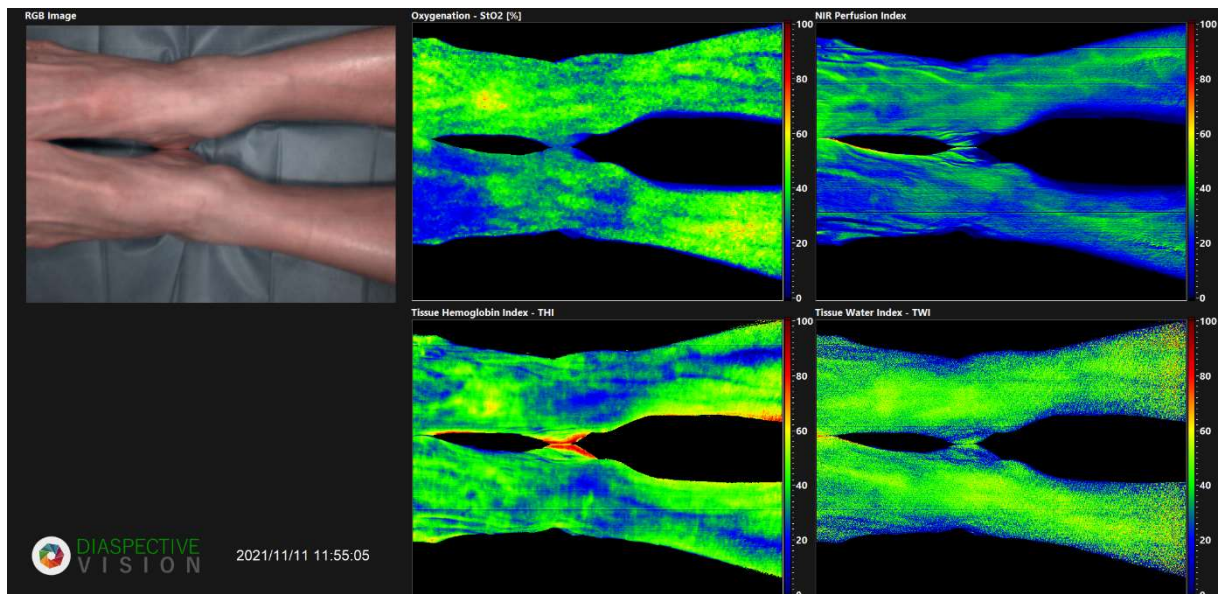


Abbildung 40: HSI-Messung nach Placebo-Therapie

Den Erwartungen entsprechend, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den beiden Messungen vor und nach der Placebo-Therapie. Im Bereich der Gewebssperfusion zeigen sich sogar negative Effekte, da diese herabgesetzt wurde.

5. Diskussion

Es konnten mehrere positive Effekte nachgewiesen werden, welche die CO₂-Trockenbadtherapie mit sich bringt und im Folgenden zusammengefasst werden. Die Messsysteme der Firma „Diaspective Vision GmbH“ und „COMMIT® GmbH“ haben sich durch ihre einfache Handhabung bewiesen. Dabei kam es selten zu Messfehlern aufgrund messtechnischer Fehlfunktionen.

HRV-Messung

Probandengruppen-Auswertung

Bei dem Großteil der Probanden zeigte sich eine positive Wirkung der Therapie auf das vegetative Nervensystem, welches sich durch erhöhte parasympathische Aktivität auszeichnete.

Auswirkungen der Therapielänge

Es konnte nachgewiesen werden, dass bei beiden Therapielängen eine Wirkung auf das vegetative Nervensystem zu verzeichnen ist. Eine stärkere parasympathische Aktivität ließ sich bei der 40 Minuten Therapie nachweisen, während die 20 Minuten Messung eine gegensätzliche Wirkung zeigte.

Auswirkungen der Therapieform

Es konnte festgestellt werden, dass bereits eine Teilbehandlung der rechten oberen Extremität einen Effekt auf das vegetative Nervensystem hat. Diese Effekte konnten durch eine Ganzkörperbehandlung verstärkt werden, hatten jedoch einen negativen Effekt auf das Zusammenspiel des Regulationsmechanismen (siehe Alpha1).

Placebo-Messung

Durch die Placebo-Messung konnte nachgewiesen werden, dass der Temperatureinfluss der Therapie nicht die gleiche Wirkung erzeugt wie die physiologischen Einflüsse des CO₂-Gases. Es konnten jedoch andere Einflüsse wie der zirkadiane Rhythmus, bestimmter Einfluss von Pharmaka und emotionale Verarbeitung, wie Stress oder Aufregung, nicht allumfassend berücksichtigt werden.

HSI-Messung

Lokale Wirkung

Die steigernden Effekte der Durchblutung und der Sauerstoffversorgung im peripheren Gewebe nach Behandlung konnten weiterhin nachgewiesen werden.

Systemische Wirkung

Es konnte während der Behandlung, zusätzlich zur lokalen Wirkung, eine systemische Wirkung gezeigt werden

Therapieoptimierung

Es hat sich gezeigt, dass die Vorbehandlung des zu therapierenden Gewebes durch bestimmte Feuchtigkeitslotionen einen verstärkenden Effekt auf die Gewebsoxygenierung hat.

Placebo- Messung

Wie schon bei der HRV-Placebo-Messung konnte gezeigt werden, dass der gefäßerweiternde Wärmeeffekt keinen Einfluss auf die Durchblutung bzw. die Gewebsoxygenierung hat.

6. Ausblick

Während der Untersuchungen konnte der Einfluss auf das vegetative Nervensystem durch eine CO₂-Trockenbadbehandlung nachgewiesen werden.

Es sind weitere Messungen in Bezug auf Therapielänge und Therapievariationen nötig, um weitere Erkenntnisse zu erlangen. Außerdem sollten mehr Probanden in die Messreihen einbezogen werden, um eine bessere statistische Grundlage zu schaffen. Des Weiteren sind Untersuchungen bei verschiedenen Umweltfaktoren vorzunehmen, da nicht bei allen Messungen exakt gleiche Bedingungen wie Tageszeit und pharmakologischer Einfluss berücksichtigt werden konnten. Ein weiterer Aspekt ist die Durchführung an Patienten mit weiteren Krankheitsbildern, um gegensätzliche Wirkungen der Therapie zu überprüfen. Zusätzlich sind Kontrollmessungen nach der Therapie sinnvoll, um anhaltende Effekte zu beobachten.

Der verbessernde Einfluss auf die periphere Durchblutung konnte unter Verwendung der HSI-Messung nachgewiesen werden. Weitere Messungen in Hinsicht auf die systemische Wirkung und der Therapieoptimierung sollten bei einer größeren Probandengruppe durchgeführt werden, um diese Ergebnisse zu festigen.

Literatur

1. Karich B, Flötgen U (2020) CO₂-Trockenbadtherapie.
<https://sportaerztezeitung.com/rubriken/therapie/3413/co2-trockenbadtherapie/>.
Zugegriffen: 1. Februar 2022
2. Karich B, Flötgen U, Rezler C (2021) Regeneration im Fußballsport. Sportärztezeitung
3. Meise P (2020) Untersuchung der Wirkungsweise der CO₂-Trockenbadtherapie bei unfallchirurgischen Fällen mittels Multispektralkamera und Laser-Doppler-Spektrophotometrie. Bachelorarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau
4. Näser J (2021) Untersuchung der CO₂-Trockenbadtherapie bei unfall- und gefäßchirurgischen Fällen mit Hilfe der Hyperspektralanalyse. Bachelorarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau
5. B. Hartmann, M, Pittler and B. Drews (1998) CO₂ Balneotherapy for Arterial Occlusion Diseases: Physiology and Clinical Practice, Universität von Freiburg
6. physioTronic (2017) CAT-Gebrauchsanweisung
7. DocCheck Medical Services GmbH (2022) Sauerstofftransport - DocCheck Flexikon.
<https://flexikon.doccheck.com/de/Sauerstofftransport>. Zugegriffen: 5. Februar 2022
8. DocCheck Medical Services GmbH (2022) Kohlendioxidtransport - DocCheck Flexikon.
https://flexikon.doccheck.com/de/Kohlendioxidtransport?utm_source=www.doccheck.flexikon&utm_medium=web&utm_campaign=DC%2BSearch. Zugegriffen: 5. Februar 2022
9. DocCheck Medical Services GmbH (2021) Bohr-Effekt - DocCheck Flexikon.
<https://flexikon.doccheck.com/de/Bohr-Effekt>. Zugegriffen: 5. Februar 2022
10. DocCheck Medical Services GmbH (2021) Haldane-Effekt - DocCheck Flexikon.
<https://flexikon.doccheck.com/de/Haldane-Effekt>. Zugegriffen: 5. Februar 2022
11. (2022) Sauerstoffbindungskurve | Physiologie | Repetico. <https://www.repetico.de/card-80029051>. Zugegriffen: 5. Februar 2022
12. Menche N, Munk K, Renz-Polster H (Hrsg) (2020) Biologie, Anatomie, Physiologie. Kompaktes Lehrbuch für Pflegeberufe, 9. Auflage. Elsevier, München
13. (2022) Herzerregung - Wissen @ AMBOSS.
<https://www.amboss.com/de/wissen/Herzerregung/>. Zugegriffen: 11. Februar 2022
14. DocCheck Medical Services GmbH (2022) Dipolvektor - DocCheck Flexikon.
<https://flexikon.doccheck.com/de/Dipolvektor>. Zugegriffen: 11. Februar 2022
15. DocCheck Medical Services GmbH (2022) Elektrokardiogramm - DocCheck Flexikon.
<https://flexikon.doccheck.com/de/EKG>. Zugegriffen: 11. Februar 2022
16. (2022) Diagnose Herzinsuffizienz: EKG verstehen | www.herzbewusst.de.
<https://www.herzbewusst.de/herzschwaechе/diagnose-herzschwaechе/elektrokardiogramm-ekg>. Zugegriffen: 11. Februar 2022
17. Hottenrott K (Hrsg) (2004) Herzfrequenzvariabilität im Fitness- und Gesundheitssport. Symposium am 8. November 2003 in Halle (Saale) ; [2. Internationales Symposium zur Herzfrequenzvariabilität im Fitness- und Gesundheitssport. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft, Bd. 142. Czwallina, Hamburg
18. DocCheck Medical Services GmbH (2022) Respiratorische Sinusarrhythmie - DocCheck Flexikon. https://flexikon.doccheck.com/de/Respiratorische_Sinusarrhythmie. Zugegriffen: 4. Februar 2022
19. Frotscher M, Kahle W, Schmitz F (2018) Taschenatlas Anatomie, Band 3: Nervensystem und Sinnesorgane, 12. aktualisierte Auflage. Thieme, Stuttgart
20. (2022) Morbus Sudeck (CRPS): Merkmale, Dauer, Therapie - NetDoktor.
<https://www.netdoktor.de/krankheiten/morbus-sudeck/>. Zugegriffen: 24. Februar 2022

21. (2022) HRV-Messung. <https://www.heartmathdeutschland.de/hrv-messung/>. Zugriffen: 28. Januar 2022
22. Creating Health (2021) Wissenschaftliche Ansprüche - Creating Health. <https://creatinghealth.de/wissenschaftliche-ansprueche/>. Zugriffen: 1. Februar 2022
23. COMMIT GmbH (2018) Das kleine Kompendium rund um die Analyse des vegetativen Nervensystems und der Herzfrequenzvariabilität
24. (2020) Technologie - Diaspective Vision. Diaspective Vision
25. Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996) Heart rate variability. European heart journal
26. Herzratenvariabilität (2019) Berechnung des HRV-Werts SDNN | Herzratenvariabilität (HRV). <https://xn--hrv-herzratenvariabilit-dcc.de/2019/01/berechnung-des-hrv-werts-sdnn/>. Zugriffen: 9. Februar 2022
27. Franke-gricksch N (2017) Berechnung des HRV-Werts RMSSD. Herzratenvariabilität (HRV)
28. (2020) HRVTool by Marcus Vollmer - German manual. https://marcusvollmer.github.io/HRV/manual_german.html. Zugriffen: 19. Januar 2022
29. Vollmer M (2015) A robust, simple and reliable measure of heart rate variability using relative RR intervals. In: 2015 Computing in Cardiology Conference (CinC). IEEE, S 609–612

Anhang

A Frequenzanalyse

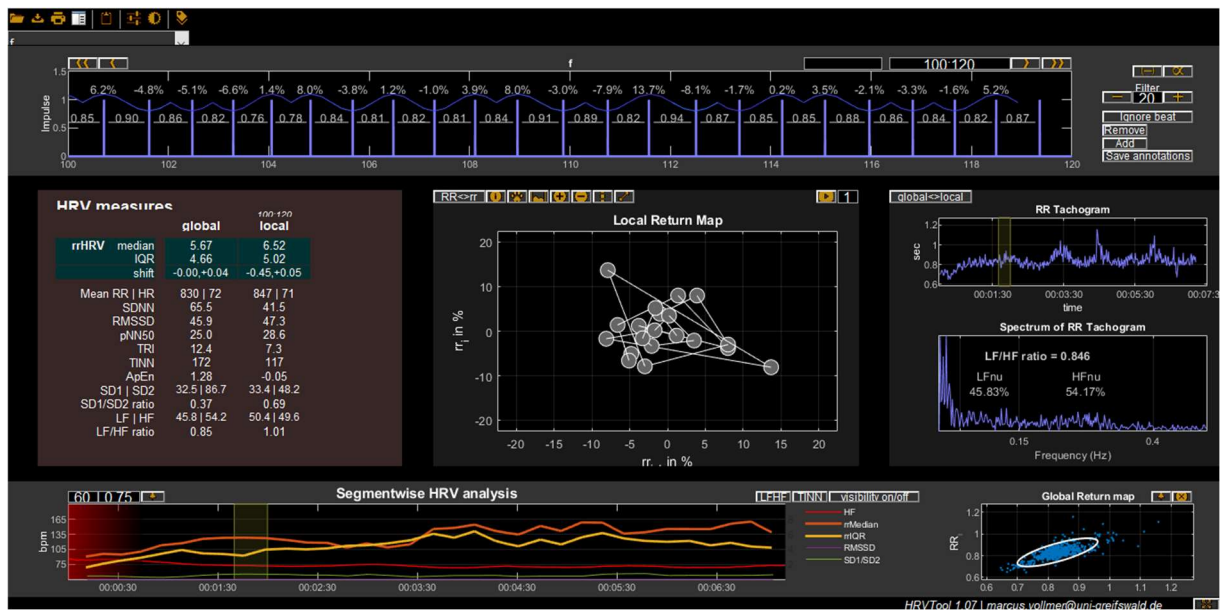


Abbildung 41: HRVTool by Marcus Vollmer [28]

B Probandengruppen-Auswertung

Tabelle 3: Zeitbereichsparameter Vor und Nach der Therapie

Vergleich vor und nach Therapie							
Alter	Geschlecht	SI vor Therapie	RMSSD vor Therapie	SDNN vor Therapie	SI nach Therapie	RMSSD nach Therapie	SDNN nach Therapie
17 m		124,70	20,30	45,50	125,30	19,30	48,50
18 m		29,68	59,11	84,64	22,49	79,29	96,54
20 m		100,4	13,63	41,02	15,98	73,86	111,34
22 m		139,90	22,20	37,50	24,08	67,11	90,77
29 m		54,90	47,50	82,90	40,50	58,40	83,50
36 w		41,90	31,00	59,40	144,10	28,50	40,70
40 m		116,70	19,00	37,40	114,30	23,20	42,70
45 m		346,40	12,70	25,80	168,80	11,20	35,70
46 m		75,50	28,10	60,00	31,20	38,30	103,70
48 w		211,80	12,60	31,40	140,50	18,70	34,40
51 m		187,88	14,03	35,42	56,53	22,38	70,70
54 m		158,20	14,70	41,20	113,80	15,40	48,60
55 m		168,28	11,79	41,35	115,05	15,72	45,17
55 w		104,00	19,10	50,90	89,50	24,10	48,40
56 m		95,20	16,80	51,60	131,70	23,20	33,90
57 w		82,90	59,63	41,05	57,95	73,85	61,48
60 m		147,40	24,10	31,80	81,10	26,10	37,30
60 m		27,40	29,30	78,00	17,50	38,80	98,40
62 m		228,50	10,50	33,60	82,80	21,10	55,90
66 m		129,06	35,83	44,38	54,73	42,56	47,20

Tabelle 4: Veränderung der Zeitbereichsparameter

Δ SI	Δ RMSSD	Δ SDNN
-0,60	-1,00	3,00
7,19	20,18	11,90
84,42	60,23	70,32
115,82	44,91	53,27
14,40	10,90	0,60
-102,20	-2,50	-18,70
2,40	4,20	5,30
177,60	-1,50	9,90
44,30	10,20	43,70
71,30	6,10	3,00
131,35	8,35	35,28
44,40	0,70	7,40
53,23	3,93	3,82
14,50	5,00	-2,50
-36,50	6,40	-17,70
24,95	14,22	20,43
66,30	2,00	5,50
9,90	9,50	20,40
145,70	10,60	22,30
74,33	6,73	2,82

C Therapielänge

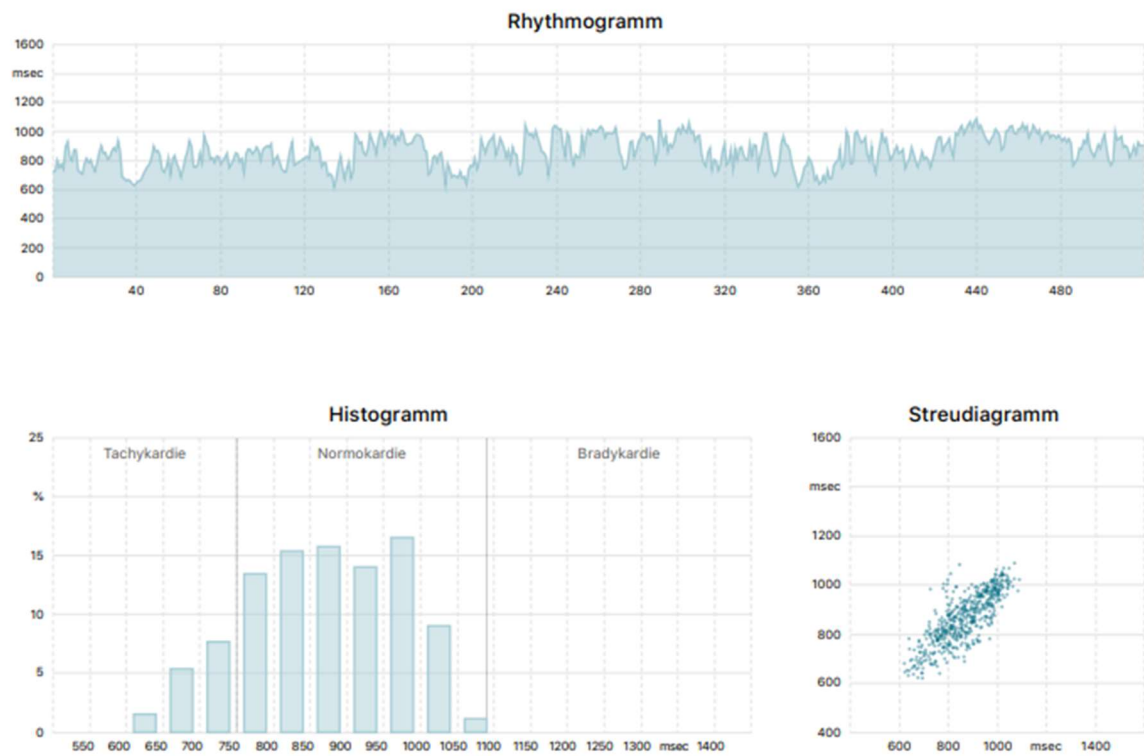


Abbildung 42: Diagramme vor 20 Minuten CO₂-Therapie

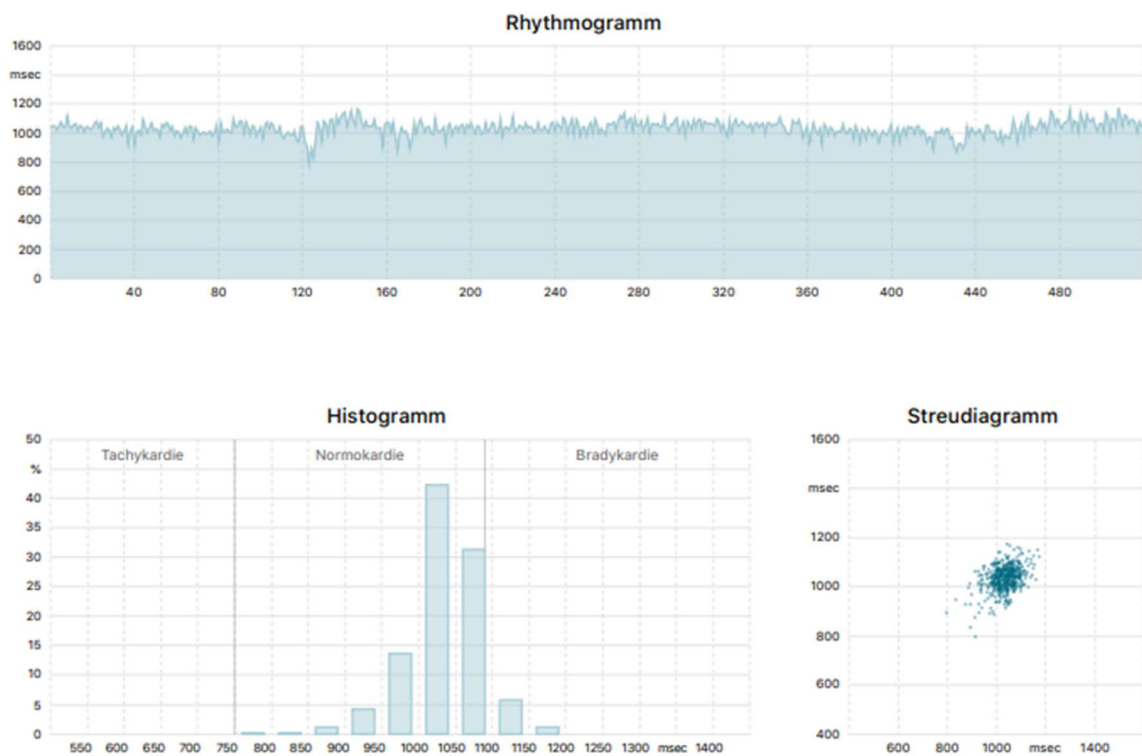


Abbildung 43: Diagramme während 20 Minuten CO₂-Therapie (nach 10 Minuten)

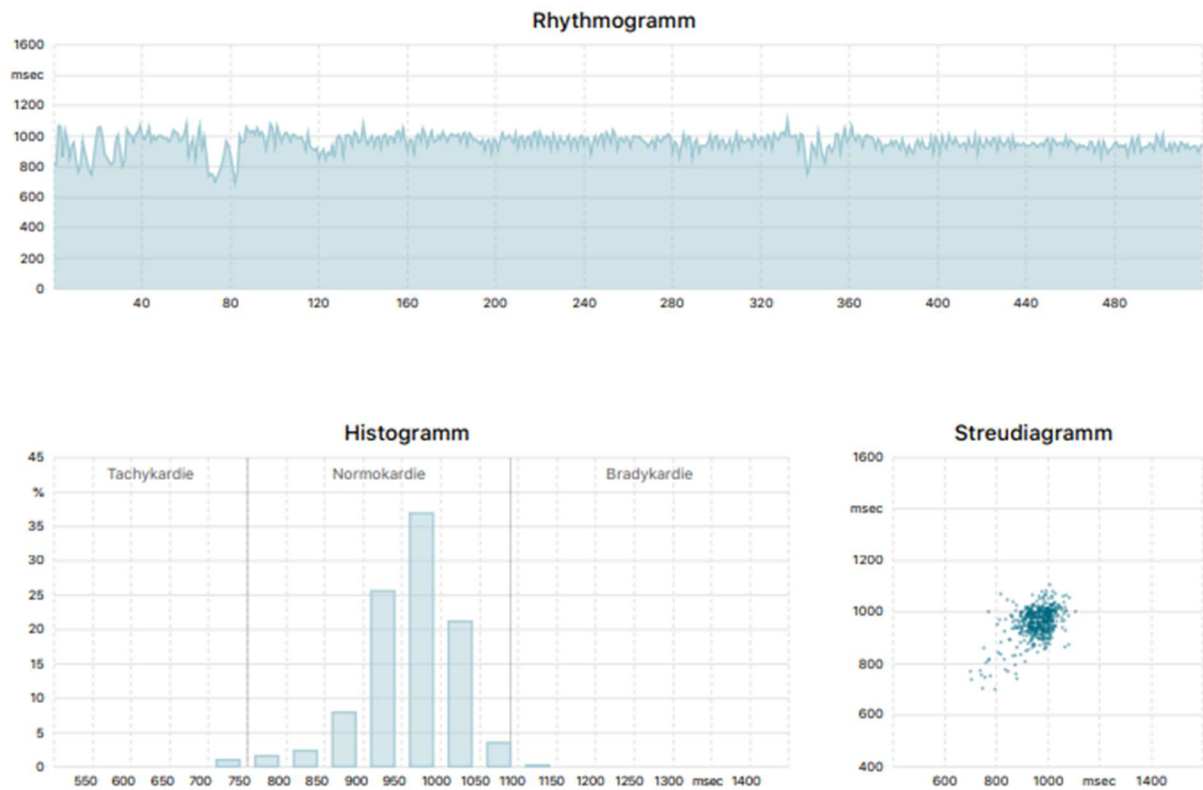


Abbildung 44: Diagramme nach 20 Minuten CO_2 -Therapie

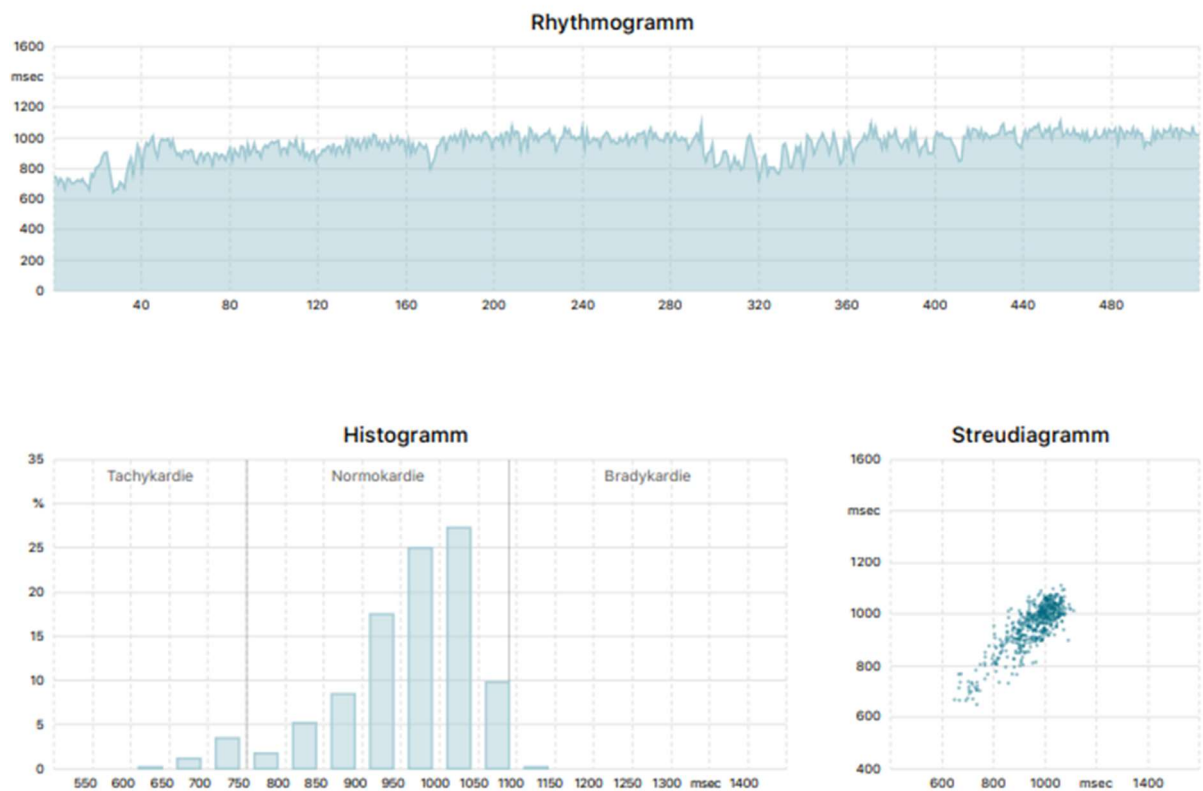


Abbildung 45: Diagramme vor 40 Minuten CO_2 -Therapie

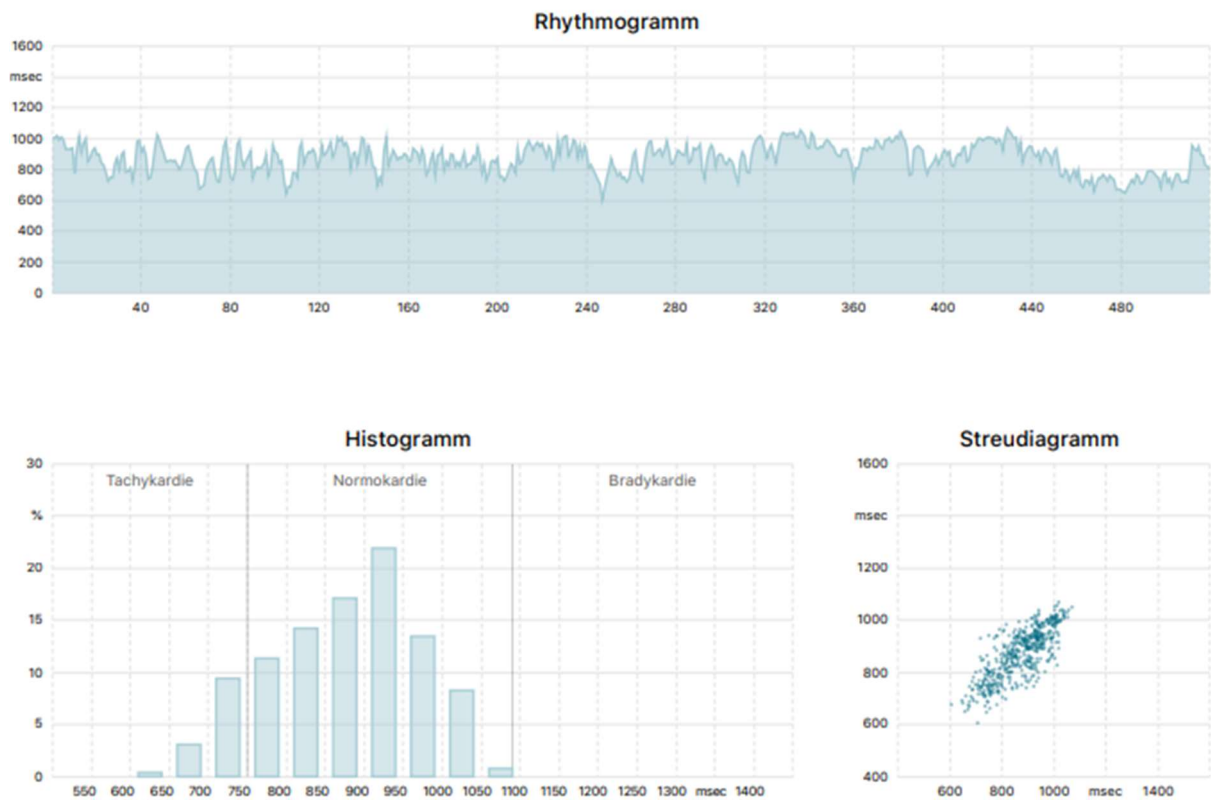


Abbildung 46: Diagramme während 40 Minuten CO₂-Therapie (nach 30 Minuten)

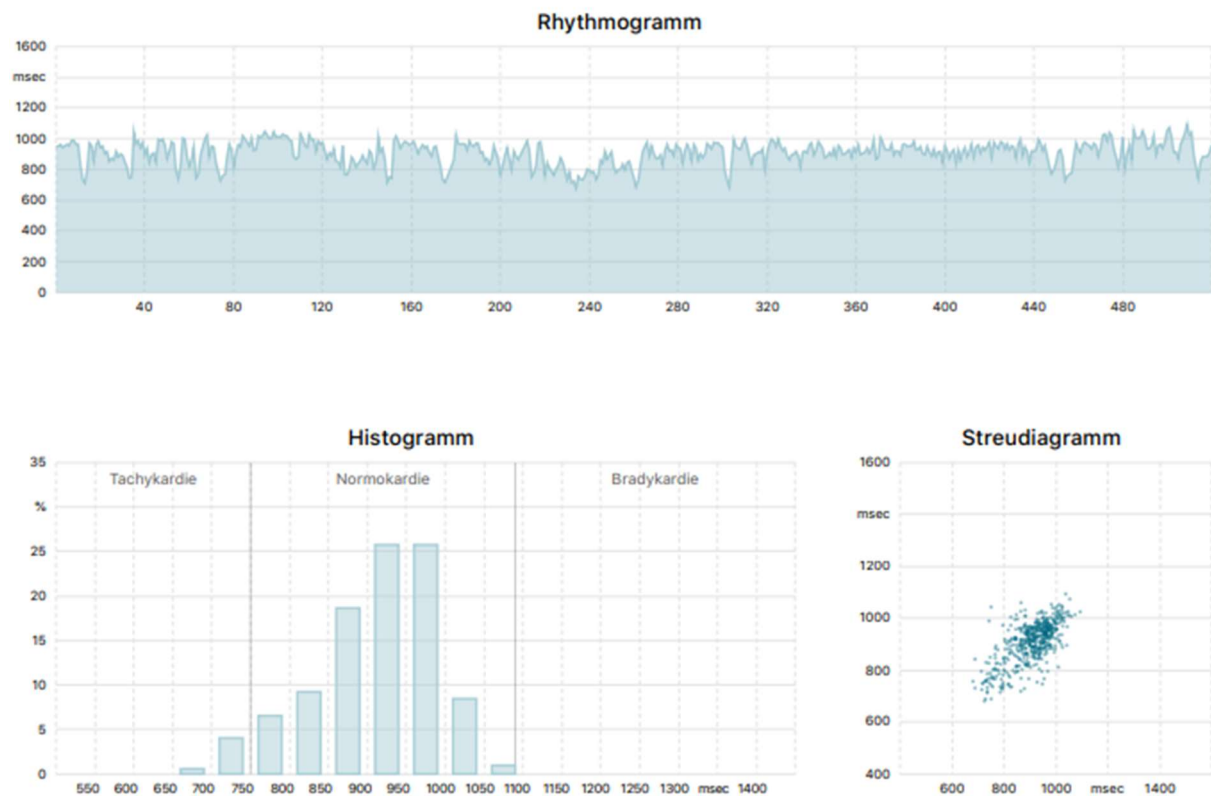


Abbildung 47: Diagramme nach 40 Minuten CO₂-Therapie

D Therapieform

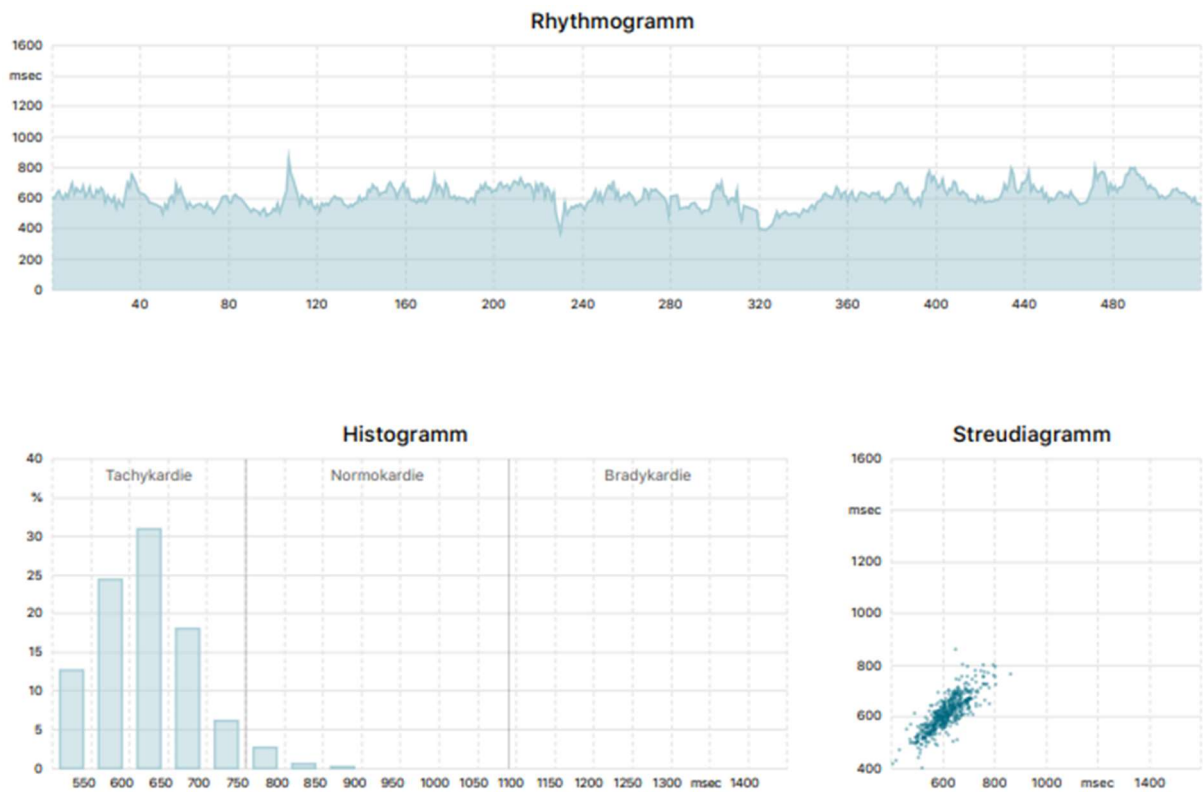


Abbildung 48: Diagramme vor 40 Minuten CO_2 -Ganzkörpertherapie

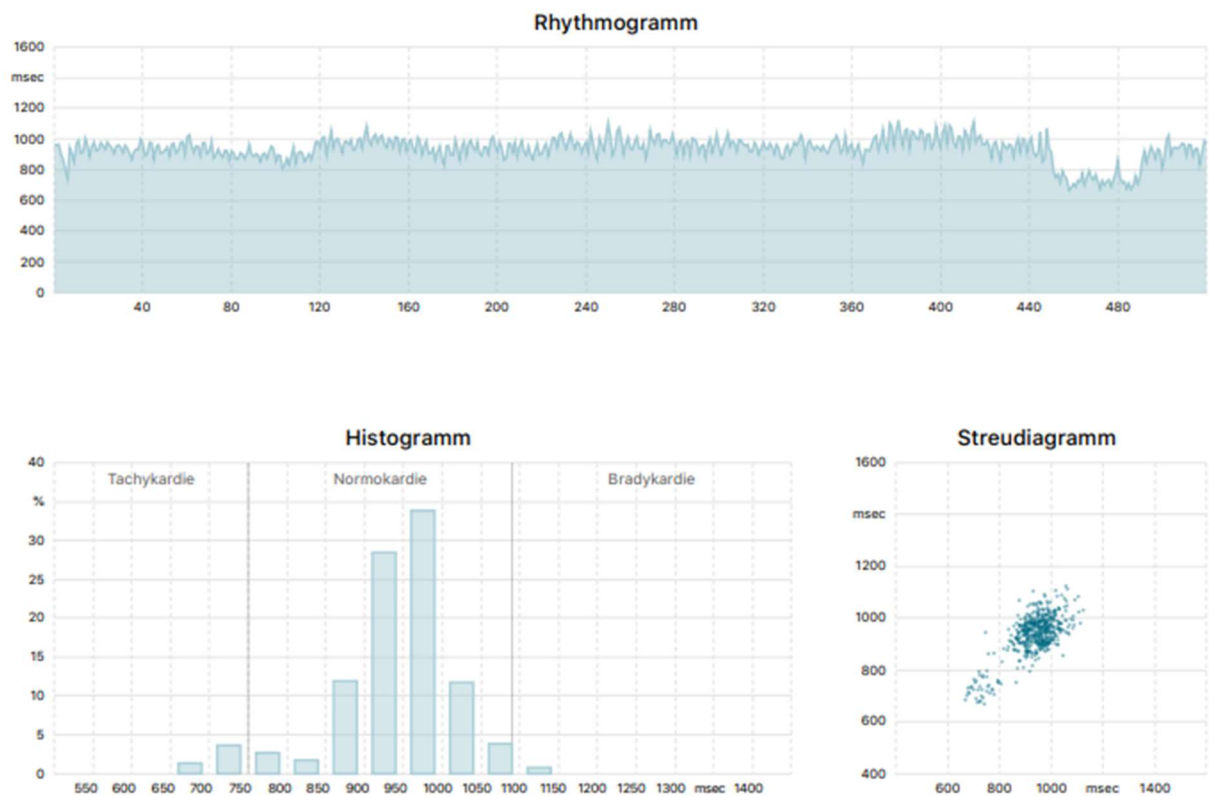


Abbildung 49: Diagramme während 40 Minuten CO_2 -Ganzkörpertherapie (nach 30 Minuten)

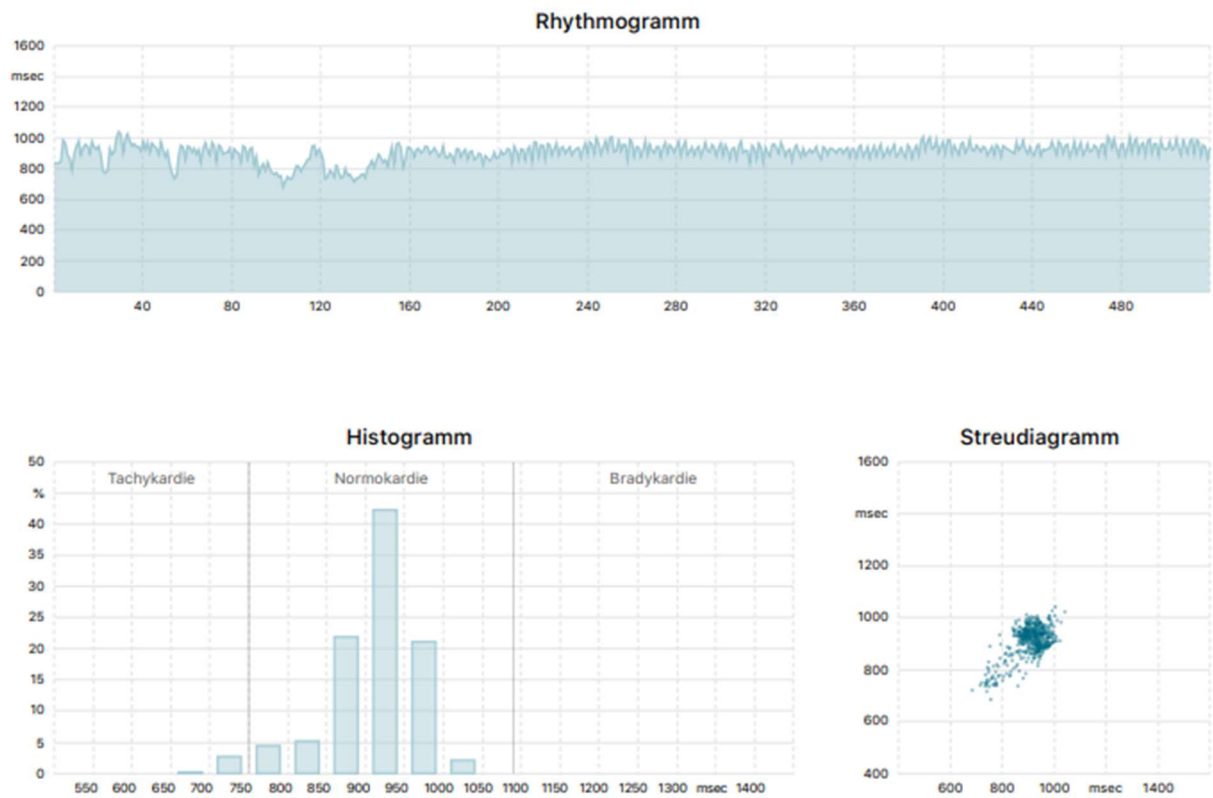


Abbildung 50: Diagramme nach 40 Minuten Ganzkörpertherapie

E Placebo-Messung

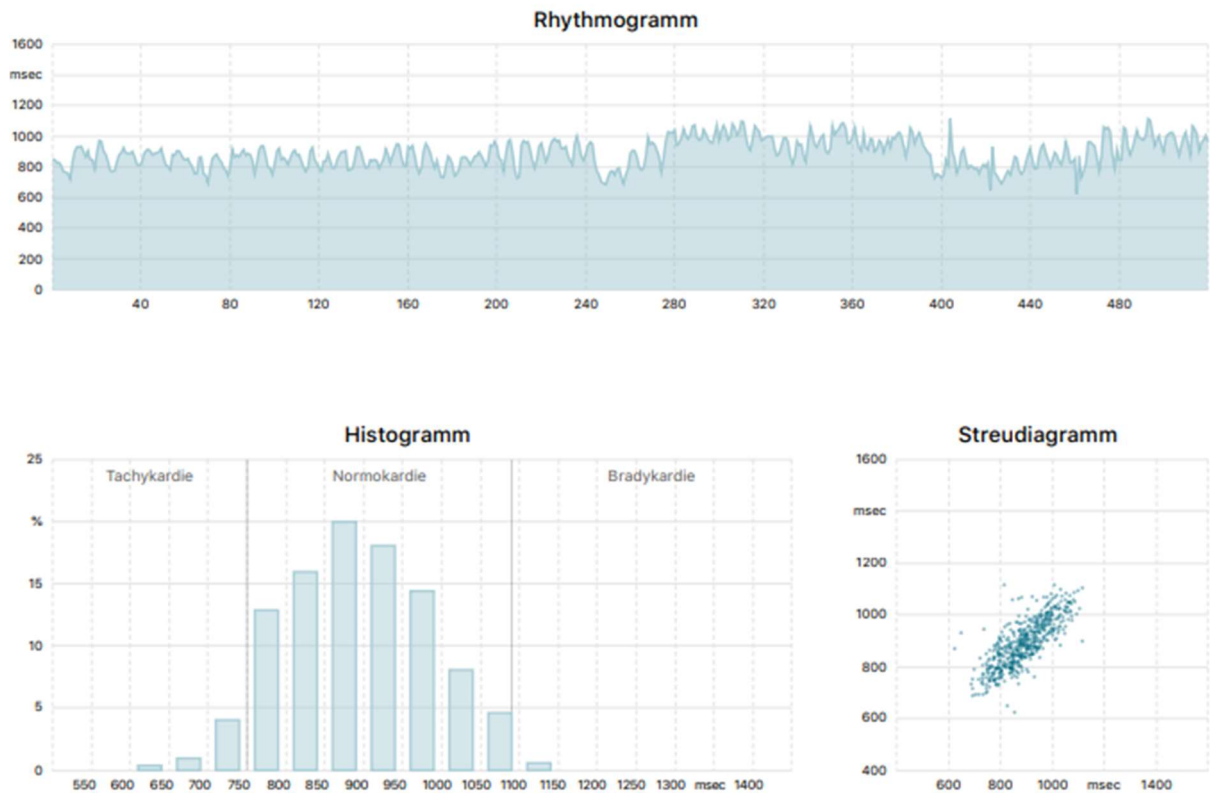


Abbildung 51: Diagramme vor CO₂ Therapie

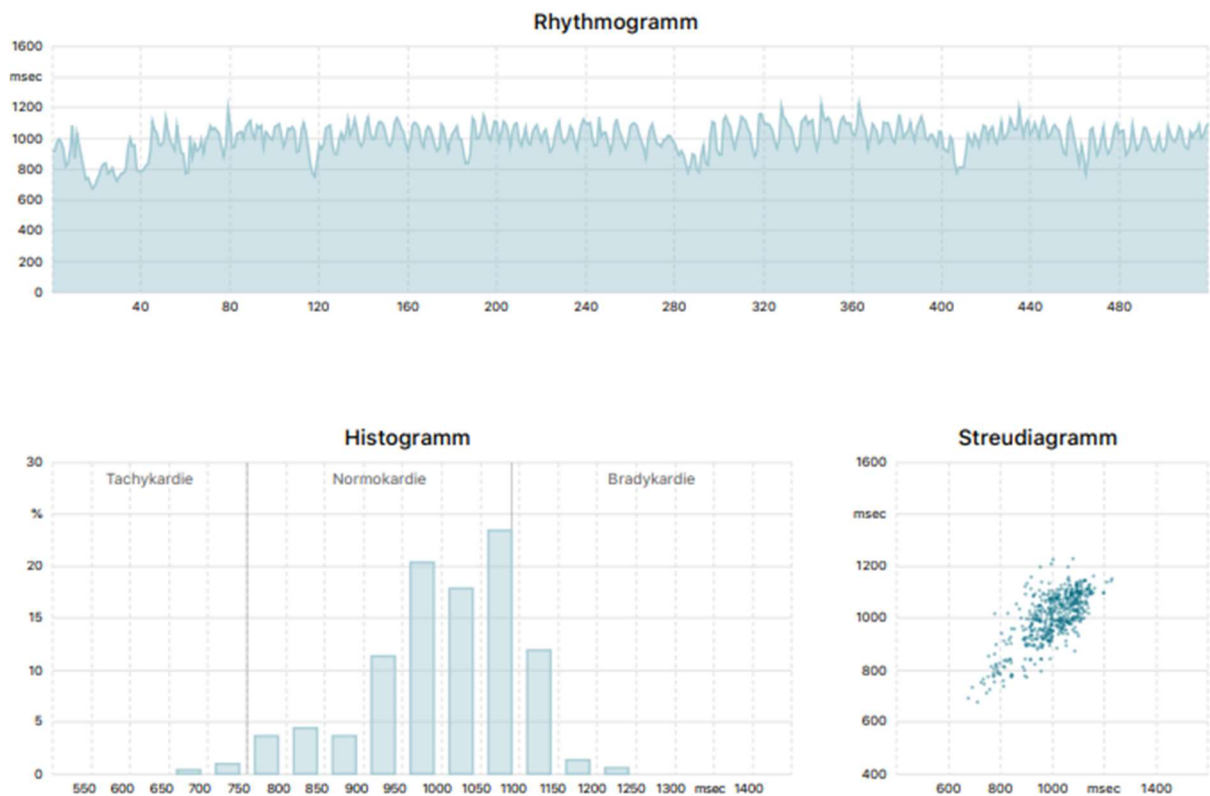


Abbildung 52: Diagramme während CO₂-Therapie

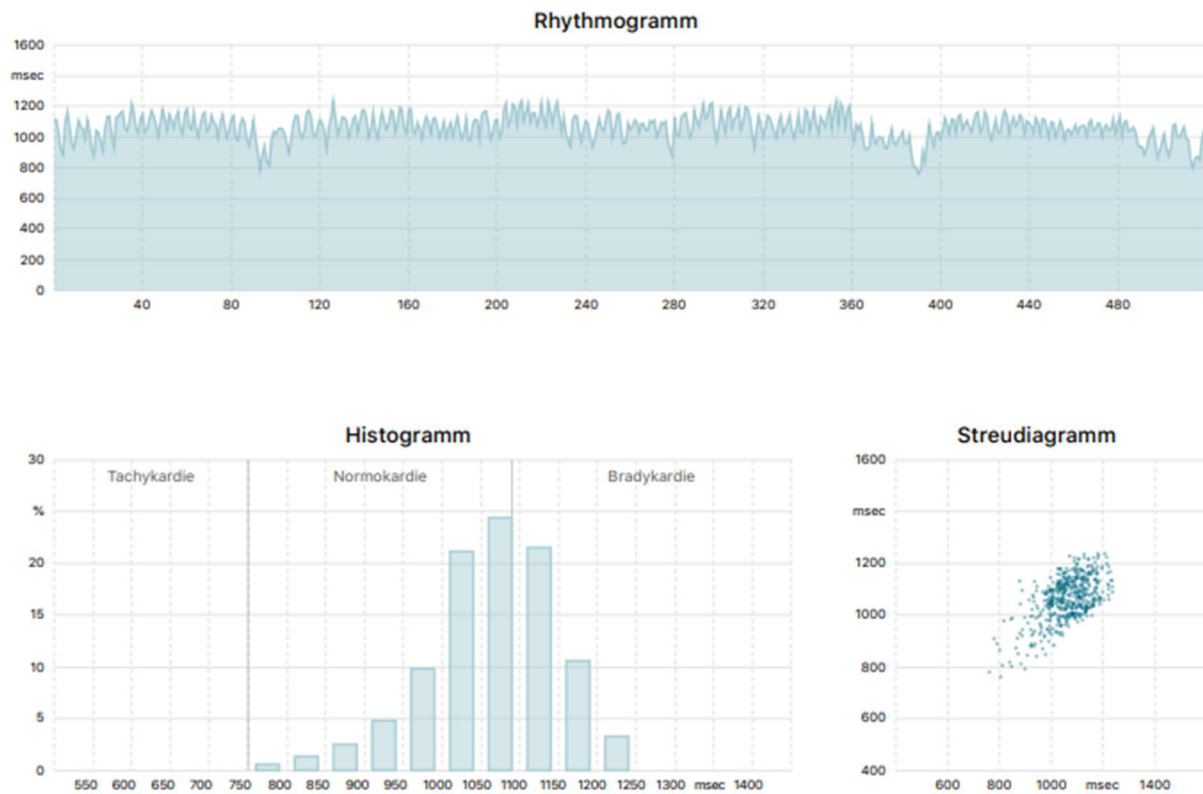


Abbildung 53: Diagramme nach CO₂-Therapie

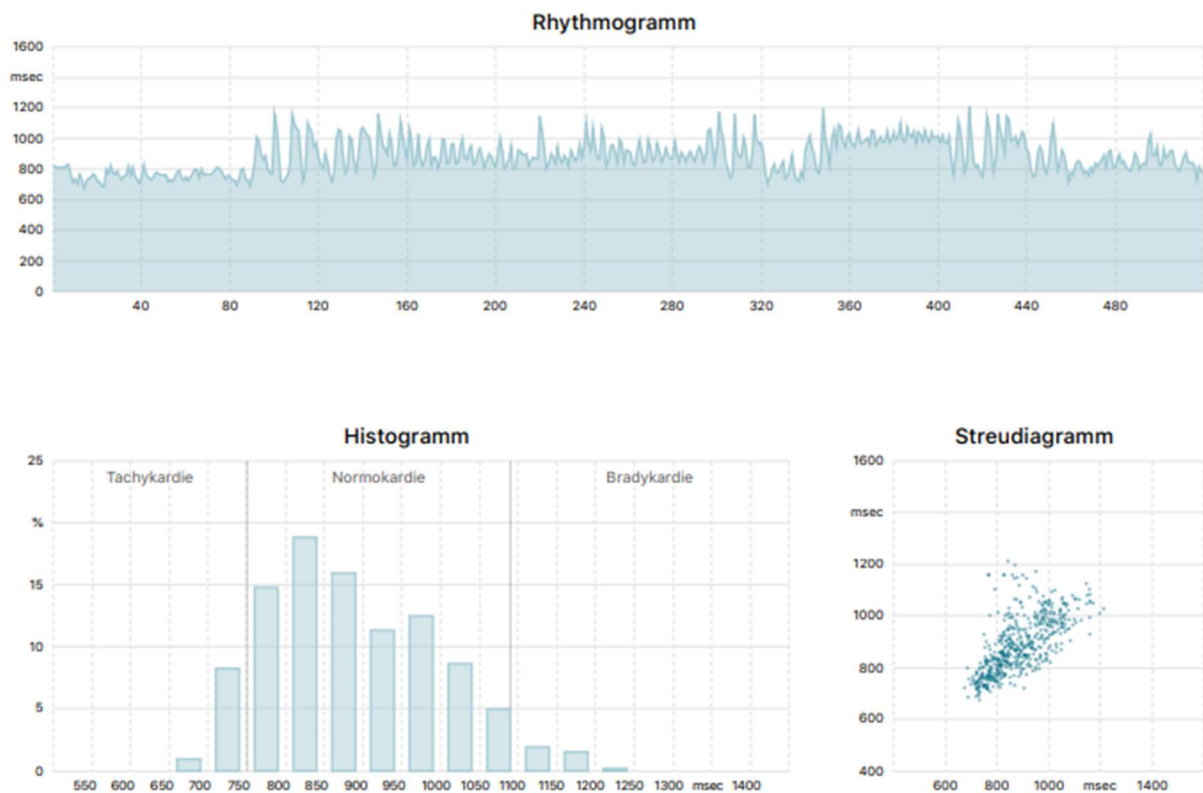


Abbildung 54: Diagramme vor Placebo Messung

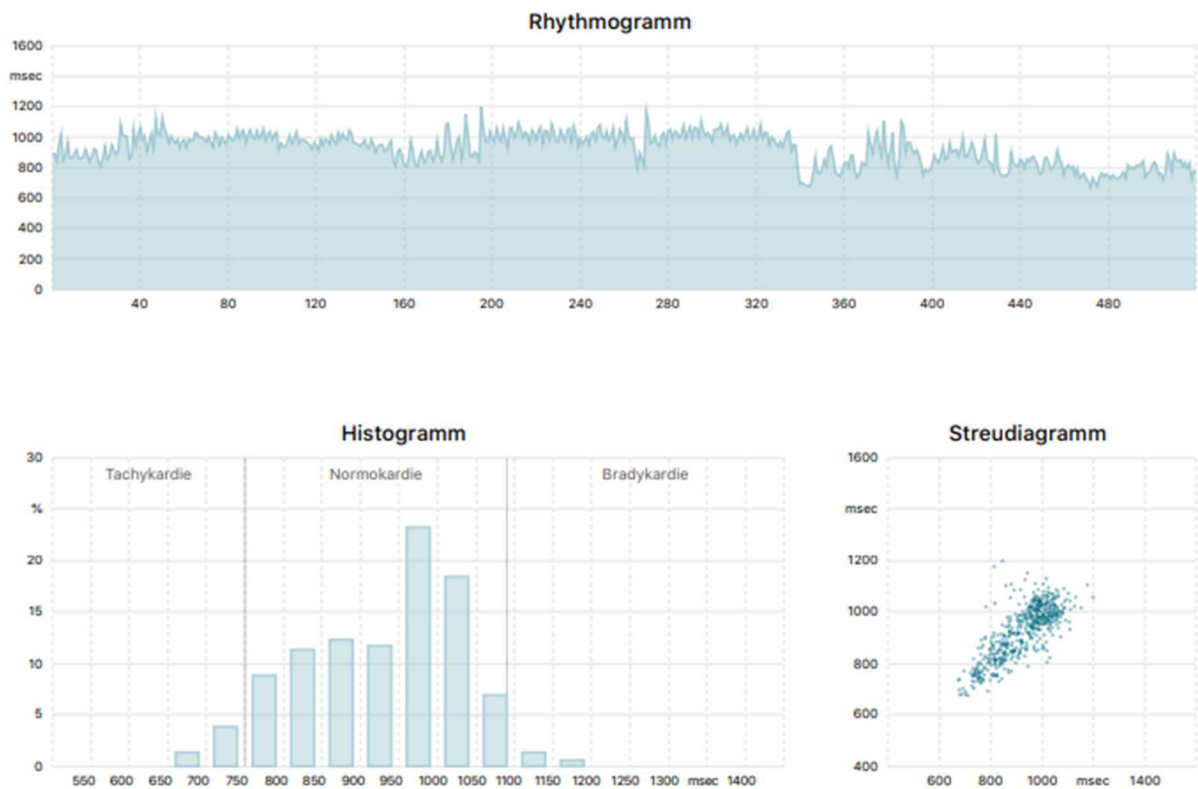


Abbildung 55: Diagramme während Placebo Messung

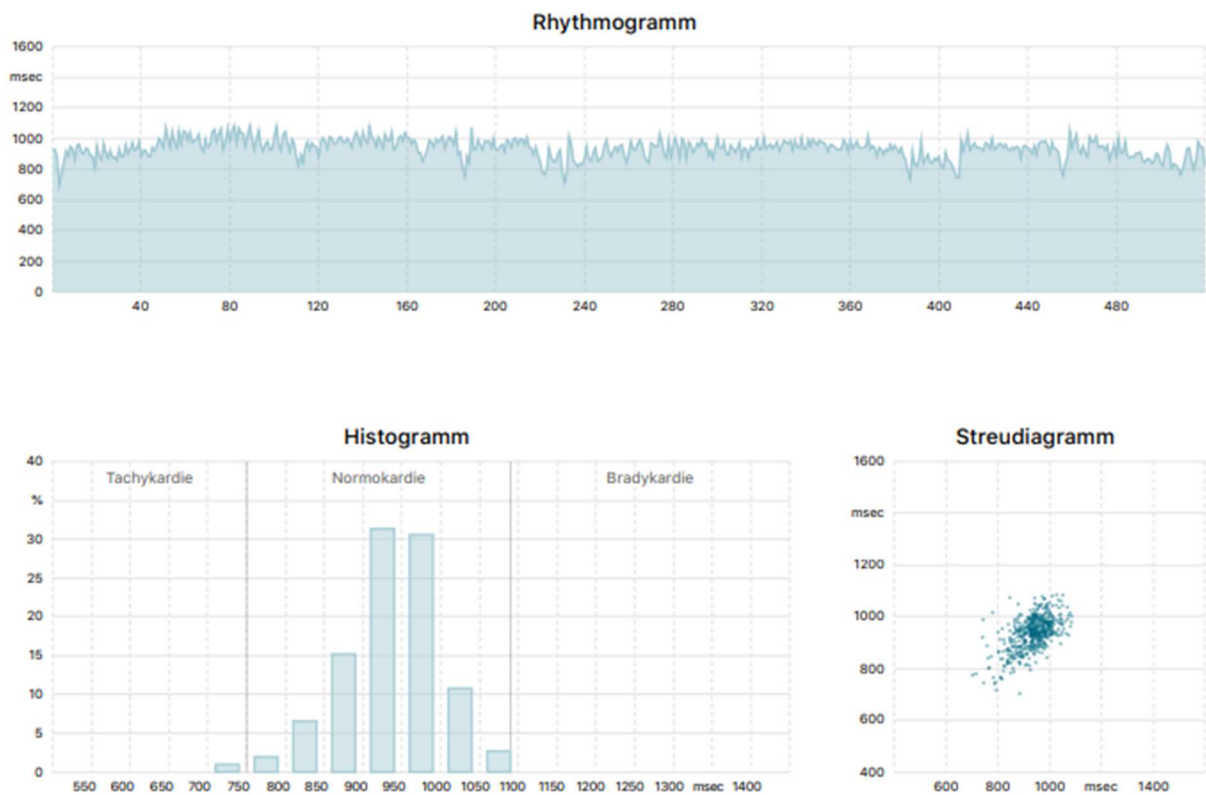


Abbildung 56: Diagramme nach Placebo-Messung

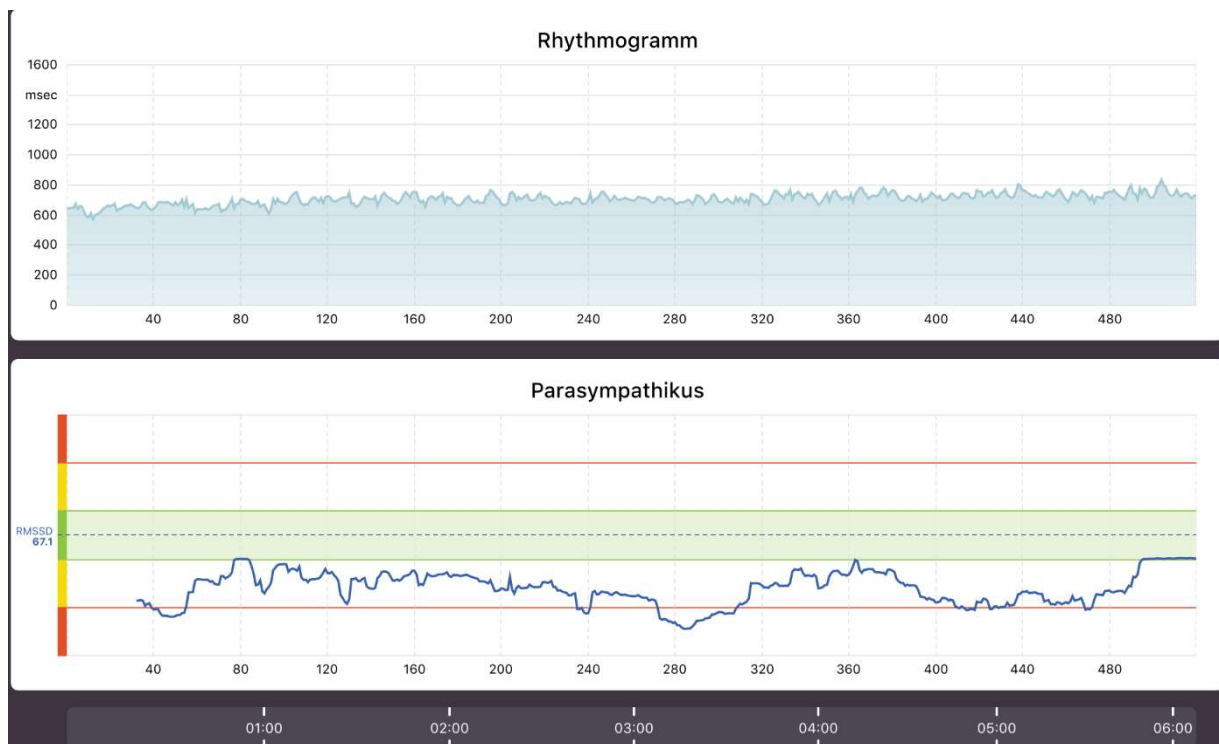


Abbildung 57: Vor Behandlung mit CO₂

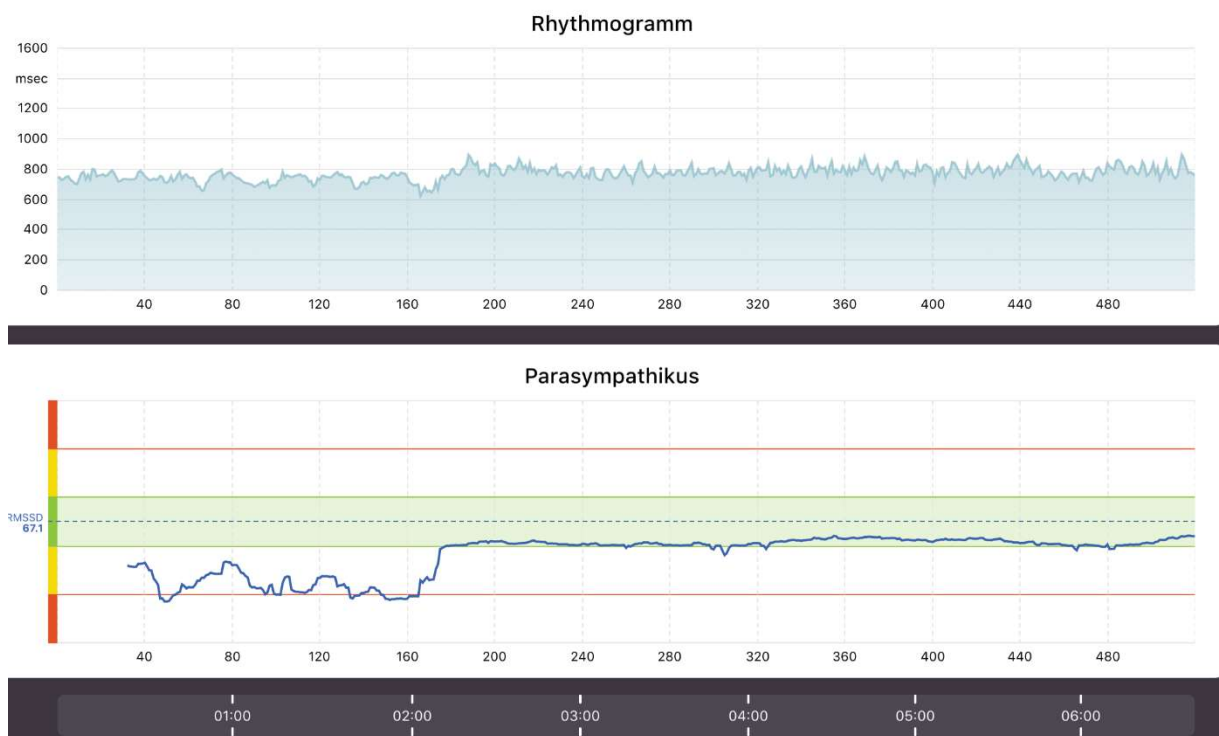


Abbildung 58: Während Behandlung mit CO₂

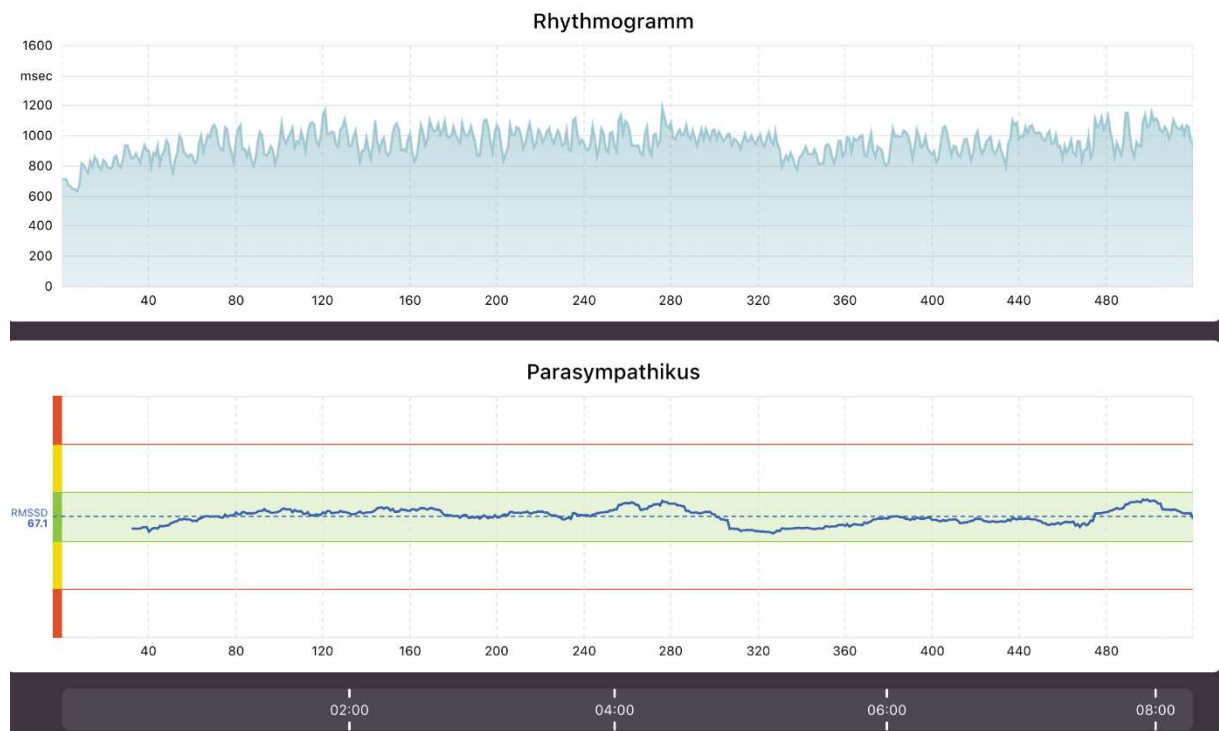


Abbildung 59: Nach Behandlung mit CO₂

Tabelle 5: Temperaturmessung bei CO2 Therapie

θ in °C	Minute	Bemerkung
28,4	1	Start vakuumieren
29,5	2	Einlass CO2
29,8	3	
30,2	4	
30,4	5	Start der Therapie
30,4	6	Start 2. Messung
30,5	7	
30,6	8	
30,7	9	
30,7	10	
30,5	11	
30,8	12	
30,8	13	
30,7	14	
30,7	15	Ende 2. Messung
30,9	16	
30,8	17	
30,8	18	Start 3. Messung
30,8	19	
30,8	20	
30,9	21	
30,9	22	
30,9	23	
31	24	
31	25	
31	26	Ende 3. Messung
30,9	27	Auslass CO2
30,1	28	
29,4	29	Therapie beendet
24,8	30	Start 4. Messung
23,3	31	
22,7	32	
22,5	33	
22,3	34	
22,1	35	
21,7	36	
21,6	37	
21,5	38	
21,5	39	
21,5	40	Ende 4. Messung

Tabelle 6: Temperaturmessung bei Luft

θ in °C	Minute	Bemerkung
27,5	1	Start 1. Messung
27,7	2	
28,2	3	
29,2	4	
29,4	5	
29,6	6	
29,7	7	
29,7	8	
29,8	9	Ende 1. Messung
29,7	10	
30,3	11	Einfüllen der warmen Luft
30,4	12	Start 2. Messung
30,4	13	
30,6	14	
30,4	15	
30,4	16	
30,5	17	
30,5	18	
30,5	19	
30,6	20	Ende 2. Messung
30,6	21	
30,7	22	Start 3. Messung
30,9	23	
31	24	
30,1	25	
29,9	26	
29,8	27	
29,8	28	
29,9	29	
29,9	30	Ende 3. Messung
29,9	31	
30,1	32	
30,3	33	Auslassen der warmen Luft
27,5	34	Start 4. Messung
25,6	35	
23,4	36	
23,5	37	
22,7	38	
22,5	39	
22,3	40	

F Systemische Wirkung

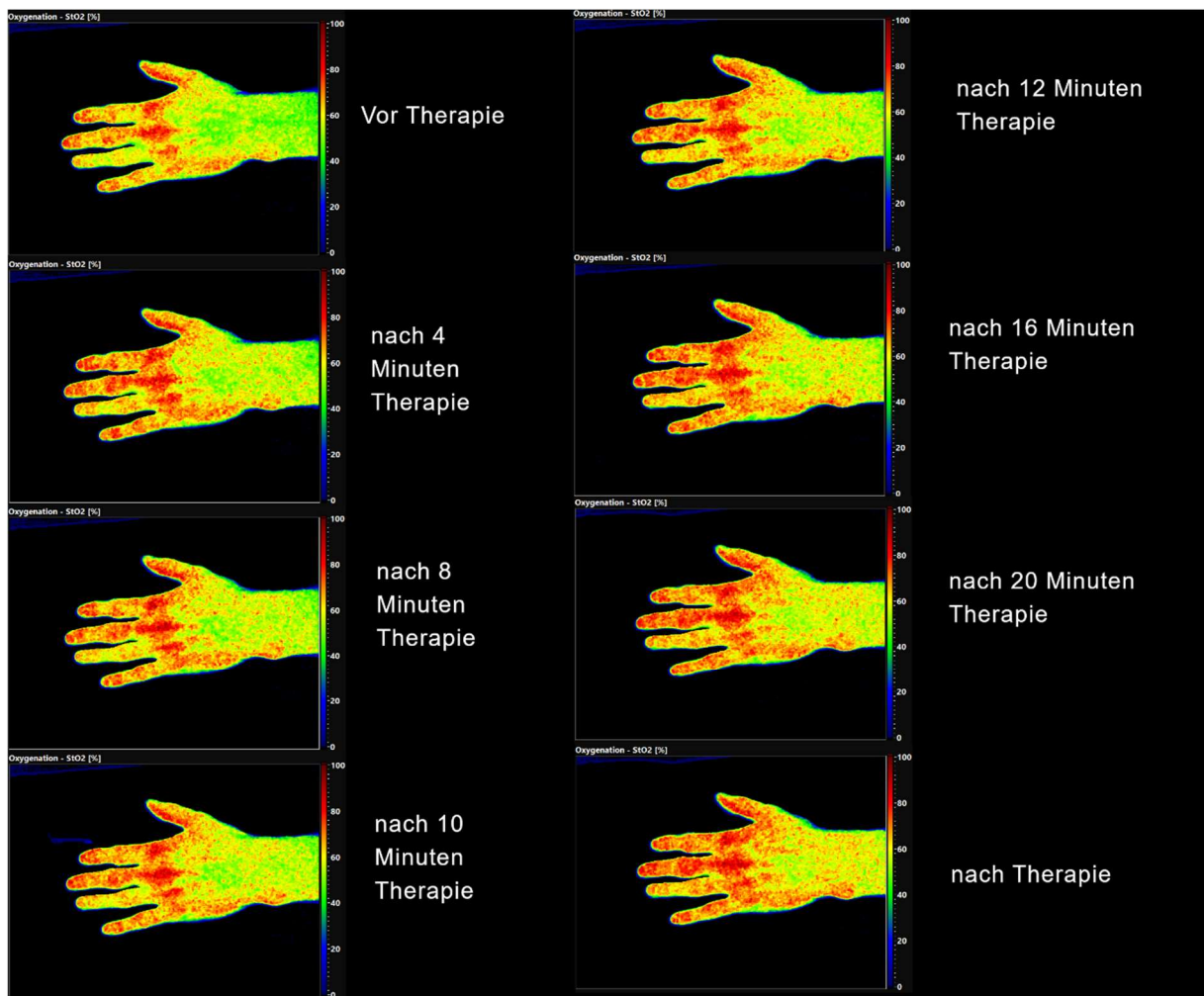


Abbildung 60: Messreihe Oxygenierung Systemische Wirkung

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit ohne fremde Hilfe und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Außerdem versichere ich, dass diese Arbeit vorher bei keiner Prüfungskommission vorgelegt wurde.

Zwickau, den 31.03.2022

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'L. Schmidt', is written above a horizontal line.

Unterschrift