Universitätsklinikum Ulm
Klinik für Psychosomatische Medizin und Psychotherapie
Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. Harald Gündel
Sektion Medizinische Psychologie
Leitung: Prof. Dr. Steffen Walter

Detektion relevanter Merkmale von emotionalem und mentalem Stress aus Biosignalen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von

Carolin Ungethüm,

geboren in Rodewisch

- 2023 -

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Thomas Wirth
1. Berichterstatter:	Dr.-Ing. Dilana Hazer-Rau
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Friedhelm Schwenker
Tag der Promotion:	27.06.2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Abkürzungsverzeichnis III
1 Einleitung 1
1.1 Stress 3
1.1.1 Physiologie 4
1.1.2 Stressmodelle 4
1.1.3 Emotionaler und mentaler Stress 5
1.1.4 Stressfolgen 7
1.2 Methoden der Stressdetektion 9
1.3 Psychophysiologische Biosignale 10
1.3.1 Biosignal EKG 10
1.3.2 Biosignal Atmung 11
1.3.3 Biosignal EDA 11
1.3.4 Biosignal Temperatur 12
1.3.5 Biosignal EMG 12
1.4 Einfluss von Stress auf Biosignal-Features 12
1.5 Zielsetzung 16
2 Material und Methoden 17
2.1 Studiendesign und Versuchsablauf 17
2.2 Verarbeitung der Biosignale 19
2.3 Featureselektion 24
2.4 Statistische Analyse 29
3 Ergebnisse 31
3.1 Deskriptive Statistik und weitere Selektion 31
3.2 Friedman-Test 36

3.3 Korrelationsanalyse 47
3.4 ANOVA mit Messwiederholung 47
3.4.1 EKG ANOVA 47
3.4.2 Atmung ANOVA 49
3.4.3 EDA ANOVA 50
3.4.4 Temperatur ANOVA 51
3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse 55
4 Diskussion 58
5 Zusammenfassung 64
6 Literaturverzeichnis 66
7 Anhang 76
Abbildungsverzeichnis 88
Tabellenverzeichnis 89
Danksagung 90
Lebenslauf 91

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
µS	Mikrosiemens
µV	Mikrovolt
ACTH	Adrenocortikotropes Hormon
ANOVA	Varianzanalyse, englisch: analysis of variance
ANS	Autonomes Nervensystem
CRH	Corticotropin-Releasing-Hormon
EDA	Elektrodermale Aktivität
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyogramm
f	Effektstärke bei ANOVA
F	F-Wert
GSR	Elektrodermale Aktivität, englisch: galvanic skin response
HF	High Frequency Band
HRV	Herzfrequenzvariabilität, englisch: heart rate variability
K	Kelvin
KHK	Koronare Herzkrankheit
KI	Konfidenzintervall
LF	Low Frequency Band
M.	Musculus
MAV	Mittelwerte der absoluten Werte
Md	Median
MDiff	Mittlere Differenz
mV	Millivolt

N	Grundgesamtheit
neg.	negativ
OG	Obergrenze
p	Signifikanzwert
$p_{angepasst}$	angepasster Signifikanzwert
pNN50	Prozentsatz der Anzahl an R-R-Intervallen, die mehr als 50ms auseinander liegen
pos.	positiv
r	Korrelationskoeffizient
Resp	Atmung
r_F	Effektstärke bei Friedmann-Test
RMS	Quadratischer Mittelwert
RMSSD	Quadratischer Mittelwert aller Differenzen sukzessiver R-R-Intervalle
SCI	Stress- und Coping-Inventar
SCWT	Stroop Colour-Word Test
SD	Standardabweichung
SDNN	Standardabweichung der R-R Abstände
SRI	Stress Response Inventory
Temp	Temperatur
tp	Gesamtspektralleistung, englisch: total power
TSST	Trier Social Stress Test
UG	Untergrenze
$\bar{x}$	Mittelwert
z	Teststatistik
ε	Epsilon
η_p^2	partielles Eta-Quadrat

χ^2	Chi-Quadrat

1 Einleitung

Stress ist ein allgegenwärtiges Thema in der heutigen Gesellschaft. Unter anderem weil der Leistungsdruck im Beruf, aber auch im privaten Umfeld immer weiter ansteigt, ebenso wie die damit assoziierten Folgen [47]. Dies spiegelt auch die 2016 von der Techniker Krankenkasse durchgeführte Studie zu Thema Stress in Deutschland wider. Hier wird beschrieben, dass sich 61 % der Befragten manchmal oder häufig gestresst fühlen [112]. Das sind 4 % mehr als in der 2013 äquivalent durchgeführten Studie [112]. Fast die Hälfte der Befragten gibt den Beruf (o. Ä. wie Schule oder Studium) als relevanten Stressor an. Dem folgen die Erwartungen der Personen an sich selbst, zu viele Termine in der Freizeit, die Teilnahme am Straßenverkehr und die ständige Erreichbarkeit beispielsweise durch das Mobiltelefon [112].

Vor allem im Bereich der Psychosomatik wird das Thema Stress häufig untersucht, da es sich hierbei um psychologische und physiologische Reaktionen handelt, die z. B. auf Grund eines äußeren oder inneren Reizes entstehen. Im Rahmen dessen kann es zu einer Disbalance zwischen der Beanspruchung und den eigenen Bewältigungsmöglichkeiten kommen [4].

Bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigt sich die Forschung mit Stress, anfangs mit der Stressreaktion an sich und deren Folgen für den Menschen. Im Laufe der Zeit widmet sie sich zunehmend dem Thema der Stressmessung. Die Relevanz der Forschung ergibt sich unter anderem aus den Stressfolgen. Beispielhaft sei an dieser Stelle erwähnt, dass besonders lang andauernder, chronischer Stress zu Schäden in Körper und Geist führen kann. Dies geschieht, wenn sich Körper und Geist nicht mehr erholen und in eine Erschöpfungsphase übergehen, in der keine sofortige Regeneration mehr möglich ist.

Entsprechend der aktuellen Forschung liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Stressmessung. Relevant sind solche Messungen, um die physiologischen und psychologischen Prozesse im Menschen besser zu verstehen. Denn nicht alle Menschen sind sich des Ausmaßes ihres Stresses bewusst oder können ihren psychischen Zustand richtig deuten. In anderen Situationen ist eine Person gar nicht in der Lage mitzuteilen, ob sie gestresst ist, beispielsweise in einem

Operationssetting. Allein aus diesen wenigen Beispielen ergeben sich zahlreiche Indikationen zur objektivierten Stressmessung.

Eine Methode für die Forschung daran sind Maschinelle Lerner. Einer Maschine, meist einem Computer, wird eine gewisse Menge an Daten vorgegeben, die nach Kategorien eingeteilt sind. Die Maschine ist so programmiert, dass sie spezifische Merkmale und die Ausprägungen der Daten in den jeweiligen Kategorien erkennt und im Folgenden die Daten eines neuen Datensatzes, anhand der gelernten Merkmale, in die Kategorien einteilt. Für das konkrete Beispiel hier würde das bedeuten, dass ein Computer, der gelernt hat stressassoziierte Merkmale in z. B. Biosignalen zu erkennen, anhand von Biosignaldaten einer Person unterscheiden kann, ob diese gestresst ist oder nicht.

Alternativ dazu besteht eine weitere Methode der Stressforschung in der manuellen und statistischen Analyse von stressrelevanten Features, welche in dieser Arbeit Anwendung findet. Der Begriff „Feature“ beschreibt hierbei ein messbares Merkmal eines bestimmten Zustandes. Konkret werden in dieser Arbeit spezifische Merkmale eines Messsignals auf ihren Zusammenhang mit Stresszuständen untersucht. Erkenntnisse dieser Methode sind somit, welche Features für die Stressdetektion nutzbar sind.

Hieraus ergibt sich eine weitreichende Bedeutung für Stressmessungen. Denn die Features sind vielfältig einsetzbar, beispielsweise indem sie wiederum in Maschinellen Lernern genutzt werden und somit automatisierten Stressdetektionsmechanismen in der Forschung dienen. Des Weiteren können sie in Biofeedback-Systeme integriert werden. Hier werden die Features einerseits zur Stresserkennung genutzt. Andererseits können diese Systeme direkt im Anschluss zur Stressreduktion und damit auch zur Prävention von Gesundheitsrisiken eingesetzt werden. Dies hat nicht nur individuellen Nutzen. Zu hohe Stressbelastung kann Krankheiten oder Unfällen hervorrufen, was wiederrum medizinische Versorgungskosten verursacht und bis hin zur frühzeitigen Berentung führen kann. Auch präventive Maßnahmen würden Kosten aufwerfen, jedoch bei richtigem Einsatz zu weniger krankheitsbedingten Ausfällen und damit effektiv geringeren Kosten führen [47].

Die extrahierten Features könnten ebenso im Hinblick auf die vermehrt digital stattfindende Lehre genutzt werden. Stressdetektionsmechanismen, auch im Rahmen von Biofeedbacks, könnten es einerseits den Lehrenden ermöglichen,

trotz der räumlichen Distanz individuell auf die Lernenden einzugehen. Andererseits könnten die Lernenden dieses System auch für sich selbst und ihre Lernstrategie nutzen, um möglichst konzentriert und nicht gestresst zu lernen.
Um all diese Möglichkeiten nutzen zu können, müssen zuvor stressrelevante Merkmale extrahiert werden. Das ist eines der Ziele dieser Arbeit.

1.1 Stress

Nach heutiger medizinischer Lehrmeinung versteht man den Reiz oder die Anforderung, die auf den Organismus wirkt als so genannten Stressor. Die entsprechende Reaktion darauf wird dann als Stress oder Stressreaktion angesehen [4, 50].
Stressoren können vielfältigen Ursprunges sein. Externen Ursprunges bedeutet die Anforderung kommt beispielsweise von einer vorgesetzten Person oder ein Mensch muss extreme Temperatursituationen ertragen. Ein Stressor internen Ursprunges liegt z. B. bei einer Person vor, die sich selbst unter Druck setzt. Zusätzlich kann zwischen psychischen (z. B. Zeitdruck, kritische Lebensereignisse) und physischen (z. B. Schlafmangel, Lärm, Schmerzen) Stressoren unterschieden werden [4, 50].
Grundsätzlich wird darüber hinaus zwischen Eustress und Disstress unterschieden. Bei Eustress handelt es sich um positiven Stress, da die Anforderung bewältigbar erscheint. Körper und Geist werden dazu gebracht leistungsfähiger zu sein. Disstress hingegen wird auch als negativer Stress bezeichnet. Hierbei erscheint die Anforderung zu schwer und kann psychisch oder physiologisch nicht mehr kompensiert werden [4].
Eine weitere Unterteilungsmöglichkeit liegt in der Unterscheidung zwischen akutem Stress und chronischem Stress. Akute Stressreaktionen haben einen zeitlich begrenzten Verlauf. Dieser ist durch die Dauer des Reizes an sich, Selbstregulationsmechanismen, psychologische Prozesse und Verhaltensweisen des Individuums bedingt. Chronische Stressreaktionen können über Jahre andauern, belasten die Person meist täglich und sind nicht mehr zwingend an den ursprünglichen Stressor gebunden [32].

1.1.1 Physiologie

Bei der Stressreaktion handelt es sich um eine evolutionär bedingte Reaktion, die unseren Vorfahren im Fall einer Bedrohung eine Flucht oder Kampfbereitschaft ermöglichte. Noch heute sind die dafür nötigen Signalwege im menschlichen Organismus angelegt, auch wenn sich die Auslöser deutlich von den ursprünglichen unterscheiden.
Eingeleitet werden diese Prozesse durch die Stimulation verschiedener Hirnareale, wie z. B. dem Locus coeruleus und corticalen Arealen mit sensorischen und emotionalen Eingängen oder durch systemische Mediatoren [11]. Dies aktiviert 2 Bereiche. Zum einen wird das autonome Nervensystem (ANS) beeinflusst, welches die Aktivität des parasympathischen Nervensystems reduziert und die des sympathischen Nervensystems erhöht [87]. Das Nebennierenmark schüttet durch die Aktivität des Sympathikus vermehrt Katecholamine (Adrenalin und Noradrenalin) aus.
Außerdem wird im Hypothalamus vermehrt Corticotropin-Releasing-Hormon (CRH) gebildet, was die Hypophyse dazu anregt, mehr Adrenocortikotropes Hormon (ACTH) freizusetzen. Dieses aktiviert die Nebennierenrinde, woraufhin dort unter anderem vermehrt Glucocorticoide ausgeschüttet werden [32, 50].
In Folge dieser hormonellen Aktivität finden verschiedene Reaktionen im Körper statt. Für diese Arbeit relevant sind unter anderem die gesteigerte Aktivität des Herz-Kreislauf-Systems [4], die Erhöhung der Atemfrequenz sowie die erhöhte Muskelspannung und Hautleitfähigkeit [4, 105].
Durch die freigesetzten Neurotransmitter kommt es im Normalfall nach der akuten Stressreaktion zur negativen Rückkopplung des Systems und damit zur Beendigung der Reaktion [90].

1.1.2 Stressmodelle

Die Entstehung von Stress und dessen Verarbeitung ist ein komplexer Vorgang. Zum Verständnis werden 3 der wichtigsten Modelle im Folgenden vorgestellt.
Das *transaktionale Stressmodell* des Psychologen Richard Lazarus gliedert sich in 3 Phasen, in denen es zum Bewältigungsversuch der Situation kommt. Es wird angenommen, dass erst die Beurteilung einer Situation zur Stressreaktion führt. Im Rahmen der primären Bewertung wird beurteilt, ob der Reiz positiv oder

negativ und relevant oder nicht relevant ist. Bei der sekundären Bewertung wird festgestellt, ob die Situation mit den eigenen Möglichkeiten bewältigt werden kann. Zum Schluss erfolgt eine Neubewertung der Situation. Stress empfindet diesem Modell nach der Mensch vor allem, wenn der Umstand negativ und relevant eingeschätzt wird, aber die eigenen Mittel zu Bewältigung unzureichend sind [4, 50].

Die bereits zuvor beschriebene Physiologie der Stressreaktion spiegelt sich in dem *Allgemeinen Adaptationssyndrom* von Selye wider. Hierbei findet eine so genannte Alarmphase unmittelbar nach dem Ereignis statt. Der Sympathikus wird aktiviert und Katecholamine werden ausgeschüttet. In der Widerstandsphase, auch Resistenzphase genannt, kommt es zur Gewöhnung und es wird vermehrt Kortisol freigesetzt. Die Erschöpfungsphase tritt bei lang andauerndem Stress auf. In dem Fall kann es zu Schädigungen im Organismus kommen [4, 50].

Bei dem *psychoendokrinen Stressmodell* nach Henry werden verschiedene Emotionen einbezogen. So ist Ärger mit einem kämpferischen Verhalten assoziiert, wobei die Freisetzung von Adrenalin und Testosteron erhöht ist. Furcht hingegen wird mit Flucht in Verbindung gebracht, auch hier ist die Ausschüttung von Adrenalin erhöht. Eine Depression zieht einen Kontrollverlust nach sich und bedingt eine Kortisol-Erhöhung und eine Verminderung des Testosterons [4, 50].

Beim Vergleich des *transaktionalen* mit dem *psychoendokrinen Stressmodell* zeigen sich bereits im Verständnis der Stressentstehung Unterschiede. Das *transaktionale Stressmodell* bezieht sich auf mentale Prozesse. Dagegen haben Emotionen, dem *psychoendokrinen Stressmodell* nach, einen großen Einfluss auf das Stressempfinden. Die sich daraus ergebende Möglichkeit der Stressunterscheidung wird im Folgenden näher erläutert und ist für die weitere Arbeit von Bedeutung.

1.1.3 Emotionaler und mentaler Stress

Stress wird als einer der häufigsten affektiven Zustände des Menschen angesehen [83]. Heutzutage wird darunter oft eine kognitive Beanspruchung verstanden – sozusagen mentaler Stress. Diese Sichtweise spiegelt sich auch im *transaktionalen Stressmodell* wider. Jedoch kann Stress auch an Emotionen gekoppelt sein und beeinflusst werden, wie das *psychoendokrine Modell* aufzeigt.

Mögliche emotionale Stressreaktionen können z.B. Ärger oder Frustration darstellen. Stress an sich wird zwar nicht zu den Basisemotion gezählt, doch kann eine Verbindung zwischen dimensionalen Modellen[a] und Stress hergestellt werden [95]. Sanches et al. zeigen einen Zusammenhang zwischen Stress und der Dimension Erregung [93]. Zudem ordnen Valenza et al. in ihrer grafischen Darstellung des Circumplexmodells (siehe Abbildung 1) Stress dem Sektor mit hoher Erregung und negativer Lust zu. In diesem Sektor lässt sich auch die Basisemotion Ärger ebenso wie Frustration finden [95, 119]. Dies zeigt, dass die Emotion Verärgerung und Stress hinsichtlich der dimensionalen Zuordnung sehr ähnlich sind.

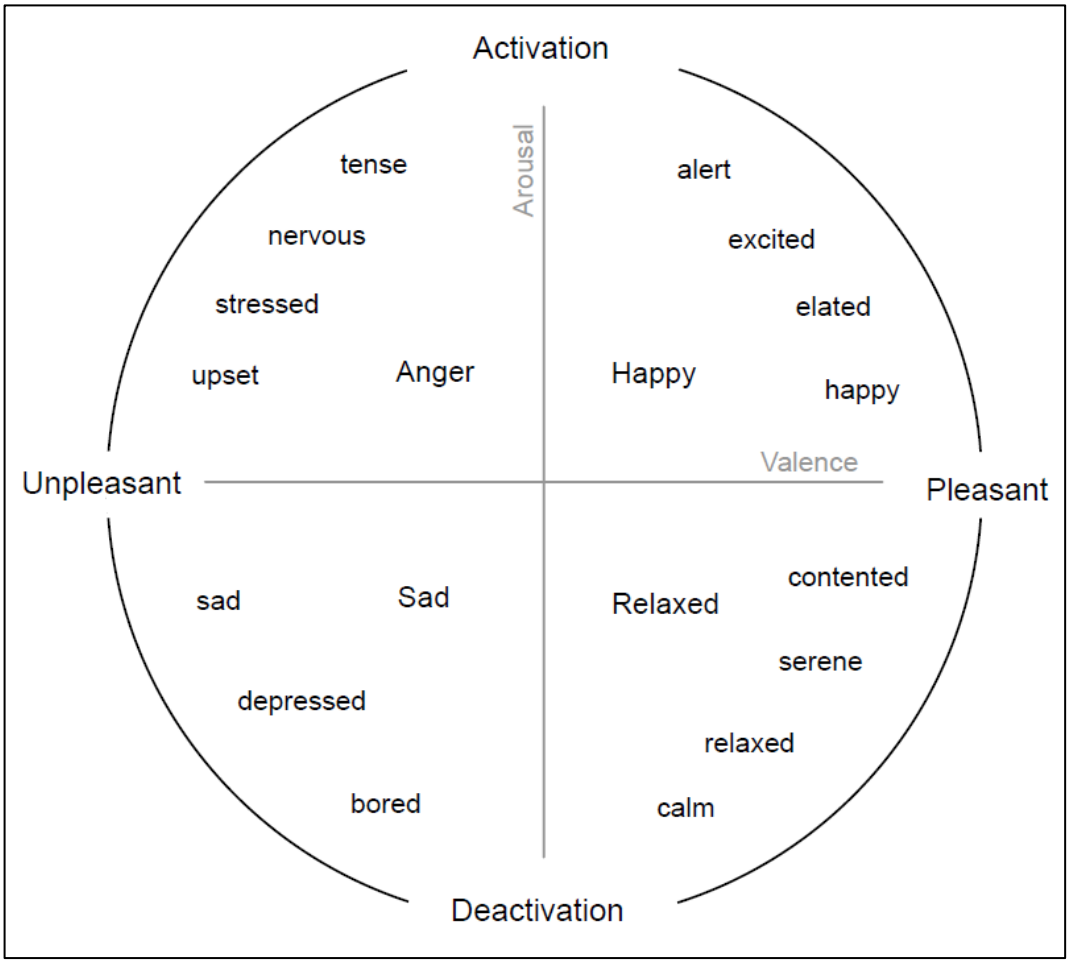

Abbildung 1: Circumplexmodell

Darstellung des Circumplexmodells mit der Dimension Lust auf der X-Achse und der Dimension Erregung auf der Y-Achse. Inhalte der Grafik aus [79] und [119].

[a] Dimensionale Modelle ordnen Emotionen in einem multidimensionalen Raum. Das von Russel eingeführte Circumplexmodell ordnet Kernaffekte in ein Modell mit den zwei Dimensionen Lust (Valence) und Erregung (Arousal) ein [91].

Der Trier Social Stress Test (TSST) ist ein in der experimentellen Psychologie eingesetztes Verfahren. Er zeigt, dass sowohl kognitive als auch emotionale/psychosoziale Komponenten in der Stressforschung beachtet werden. Im Endeffekt wird bei diesem Test jedoch nur die finale Stressreaktion betrachtet. Ob es Unterschiede zwischen den Stressreaktionen durch emotionale oder mentale Beeinflussung gibt, liegt selten im Fokus der Forschung.
Unbestritten ist, dass es einen klaren Zusammenhang zwischen Emotionen und physiologischen Reaktionen gibt [95], ebenso wie zwischen mentaler Beanspruchung und physiologischen Reaktionen [12]. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass negative Emotionen, wie z. B. Ärger und Frustration, Stressreaktionen im Körper auslösen und somit der Kategorie des emotionalen Stresses zugeordnet werden können. Dem gegenüber stehen in dieser Arbeit Stressreaktionen auf Grund von mentalem Stress, die allein durch mentale oder kognitive Aufgaben ausgelöst werden.
Eine ähnliche Einteilung nehmen auch Giannakakis et al. vor [32]. Sie unterscheiden unter anderem mentalen, psychologischen/emotionalen und sozialen Stress voneinander. Aus dem bisher wenig vorhandenen Wissen und potentiell unterschiedlichen therapeutischen Konsequenzen beziehungsweise Behandlungsmöglichkeiten ergibt sich die Relevanz dieser Unterscheidung.

1.1.4 Stressfolgen

Mögliche Folgen von Stress werden ausgiebig erforscht. Eine Erklärung für die Entstehung dieser Folgen kann das Homöostase-Allostase-Modell liefern. Demnach muss der Körper verschiedene Anpassungsreaktionen ausführen, um die Balance zwischen Organismus und Umwelt zu erhalten [4, 50]. Somit sind die physiologischen Maßnahmen auf einen Stressor kurzzeitig hilfreich und notwendig [50]. Langfristig gesehen wird jedoch nicht direkt der Stressor problematisch, sondern die entsprechenden körperlichen Reaktionen darauf [50]. Denn im Falle der chronischen Stressreaktion fehlt paradoxerweise die negative Rückkopplung [20].
Wie von Rozanski et al. beschrieben, können chronische negative Emotionen sich selbst erhalten, verbrauchen dabei Energie und beeinträchtigen durch einen Teufelskreis die Fähigkeit, auf Herausforderungen adäquat zu reagieren [90].

Chronischer Stress fördert ihrer Ansicht nach die emotionale Inflexibilität und entzieht Vitalität [90].

Die durch andauernden Stress entstehende Disbalance zwischen dem sympathischen und dem parasympathischen Nervensystem [96] wird vor allem bei einer Verschiebung hin zum Sympathikus mit einer erhöhten kardiovaskulären Morbidität und Mortalität in Verbindung gebracht [34, 78, 90]. Laut Kivimäki et al. kann Arbeitsstress das Risiko für eine koronare Herzkrankheit (KHK) um 50 % erhöhen [54]. Chronischer Stress scheint die Entwicklung von Arteriosklerose zu beschleunigen und arteriellen Bluthochdruck zu fördern. Ebenso werden Zusammenhänge zum metabolischen Syndrom und zu dessen Symptomen gesehen [11, 19, 65, 89, 115]. Entwicklungen bis hin zum plötzlichen Herztod sind möglich [11, 59, 80].

Auch kurzfristige Stresssituationen, vor allem emotionaler Qualität, können das Risiko für z. B. einen akuten Myokardinfarkt oder Ischämien erhöhen, sowohl bei vorerkrankten Personen als auch bei Gesunden [11, 23, 74, 88, 89]. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Tako-Tsubo-Kardiomyopathie [3]. Außerdem können diese Stresszustände proarrhythmogen wirken, ventrikuläre Funktionsstörungen hervorrufen oder einen Schlaganfall auslösen [11, 40, 44, 58, 59, 89]. Bei vorerkrankten Versuchspersonen werden heterogene Repolarisationsmuster in Folge einer psychologischen Stressaussetzung beschrieben [60].

Des Weiteren können bei verschiedenen Arten von psychologischem Stress Dysregulationen in der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse festgestellt werden [6, 21, 43]. In Folge dessen kann die Insulinsensitivität auf Dauer herabgesetzt und die Hämostase erhöht sein [10, 115, 124]. Reproduktive Funktionsstörungen, Störungen der Sexualfunktion, Wachstumsstörungen und Fehlregulationen des Verdauungssystems sind weitere mögliche Folgen [65, 115].

Zusätzlich kann ein biphasischer Effekt auf das Immunsystem beobachtet werden. Vor allem bei akutem Stress wird das Immunsystem in seiner Aktivität gefördert. Bei chronischem Stress kann es zu einer Immunsuppression, aber auch zu einer systemischen Inflammation kommen [19, 24, 25, 50, 115]. Studien deuten darauf hin, dass hierdurch das Risiko für die Entstehung einiger Krebsarten erhöht ist [65, 81].

Außerdem beeinflusst Stress die neuronale Plastizität. In akuten Situationen verbessert Stress das Gedächtnis, während chronischer Stress die Plastizität des Gehirns negativ beeinflussen kann, was bis hin zu einer verminderten Neurogenese reichen kann [70, 71].
Auch Hauterkrankungen und Atemwegserkrankungen, wie z. B. Asthma bronchiale, können negativ von Stress beeinflusst werden [65]. Ebenso sind affektive Störungen, wie Depressionen, mit vermehrtem Stress assoziiert [65].
Neben diesen direkten Schäden kann Stress auch zu indirekten Schädigungen führen, beispielsweise durch ein gestörtes Essverhalten, zu hohen Alkohol- und Nikotinkonsum oder zu wenig körperliche Betätigung [65].

1.2 Methoden der Stressdetektion

Bei der Stressforschung muss zwischen der Forschung an den Stressoren und der Untersuchung der eigentlichen Stressreaktion unterschieden werden [19].
Wie von Giannakakis et al. in ihrem Review beschrieben, erfolgt die Induktion von Stress in vielen Studien unter kontrollierten Bedingungen [32]. Zur Stresserzeugung werden vielfältige Methoden wie z. B. Bilder, der *Stroop Colour-Word Test* (SCWT) und Variationen davon, der TSST und Kopfrechen-Aufgaben verwendet. Zusätzlich werden teilweise Zeitdruck und Ablenkungsversuche in die Studien eingebaut. Darüber hinaus beschreiben Giannakakis et al. auch Studien, die mit Fahraufgaben und Sprachtests Stress erzeugten [32].
Um die Stressreaktion zu messen gibt es für gewöhnlich zwei Arten: subjektive und objektive Methoden. Vor allem am Anfang der Stressforschung waren die subjektiven Methoden weit verbreitet [98]. Die Schwierigkeit solcher Methoden ist, dass immer in gewissem Maße menschliches Eingreifen nötig ist, sei es bei dem Erkennen von Verhaltensmustern oder auch nur bei der Interpretation dieser [98]. Eingesetzt werden meist Fragebögen, die entweder selbst oder fremd ausgefüllt werden können oder es werden Interviews geführt [32]. Beispiele dafür sind die *Relative Stress Scale* [117, 118], das *Stress- und Coping-Inventar* (SCI) [26], das *Stress response inventory* (SRI) [51] oder Fragen zum empfundenen Stresslevel, die z. B. mithilfe einer Skala beantwortet werden können [32].
Methoden um die physiologischen Vorgänge des ANS zu messen, also objektive Verfahren, sind z. B. das Elektroenzephalogramm (EEG) [2, 32, 35, 64, 83], das

Elektrokardiogramm (EKG) [32, 35, 56, 83, 130], das Elektromyogramm (EMG) [35, 42, 128], die Blutdruckmessung [32, 83], die Hauttemperatur [83] oder die elektrodermale Aktivität (EDA) [32, 35, 56, 83, 97, 130]. Ebenso zeigen Veränderungen der Atmung [32, 35, 68] und des Pupillendurchmessers Stressreaktionen an [130]. Andere Studien basieren auf der Untersuchung von Gesichtsausdrücken [35, 130] und Sprache [32, 76, 130] oder untersuchen verschiedene Stoffe im Körper, beispielsweise die Aktivität der Alpha-Amylase [102] oder die Kortisol-Konzentration im Speichel [14, 66].
Im folgenden Kapitel wird nur auf diejenigen Verfahren eingegangen, welche für die weitere Arbeit von Bedeutung sind.

1.3 Psychophysiologische Biosignale

Viele Studien, wie auch diese Arbeit, nutzen Biosignale zur Stresserkennung. Biosignale werden oftmals als elektrische Spannungsunterschiede an der Hautoberfläche gemessen. Sie entstehen in Folge von Aktivitäten oder Vorgängen im Körper. Es können verschiedene Merkmale oder Ausprägungen dieser Biosignaldaten abgeleitet oder berechnet werden - sogenannte Biosignal-Features.
Für diese Arbeit relevant sind die Biosignale EKG, Atmung, EDA, Temperatur und EMG.

1.3.1 Biosignal EKG

Das EKG gehört im medizinischen Alltag zur Routine-Diagnostik. Es ist eine graphische Darstellung der elektrischen Potentiale des Herzens, bedingt durch Depolarisation und Repolarisation der Herzmuskelzellen. Durch Elektroden auf dem Körper können diese Spannungsunterschiede in Millivolt (mV) gemessen und als Vektoren dargestellt werden. Die Elektroden können vielfältig platziert werden. Klassische frontale Ableitungen sind die bipolare Ableitung nach Einthoven oder die unipolare Ableitung nach Goldberger.
Mit diesen Verfahren können, neben der Herzfrequenz, auch die Depolarisation der Vorhöfe anhand der P-Welle, die Depolarisation der Herzkammern anhand des QRS-Komplexes und die Repolarisation der Kammern anhand der T-Welle erkannt werden (siehe Abbildung 4).

Außerdem lässt sich mithilfe des Abstandes zwischen 2 benachbarten R-Zacken die Herzfrequenzvariabilität (HRV) berechnen. Diese wird mittels verschiedener Features beschrieben und gilt als zuverlässige Methode zur Detektion der ANS-Aktivität [98].

1.3.2 Biosignal Atmung

Das Biosignal Atmung ist relativ vielgestaltig und untersucht das Atemverhalten unter bestimmten Bedingungen. Hierbei können verschiedene Parameter wie das geatmete Volumen, die Atemfrequenz oder die Konzentrationen der geatmeten Gase bestimmt werden [68]. Dafür werden unter anderem Brustgurte verwendet, die den Bewegungen des Brustkorbes nachgeben [42] und die Dehnung in Form von Spannungsänderungen messen [52]. Zur Bestimmung von Gaskonzentrationen können z. B. Gesichtsmasken verwendet werden [68]. Entsprechend der medizinischen Lehrmeinung wird die Atmung durch vielfältige Mechanismen reguliert. Auch Emotionen können hierbei durch die Beeinflussung höherer Hirnareale Einfluss nehmen.

1.3.3 Biosignal EDA

Die elektrodermale Aktivität, auch als Hautleitwert oder in Folge von Reizen als Galvanic Skin Response (GSR) bezeichnet, gilt als zuverlässiger Indikator für Stress [98]. Es wird die Leitfähigkeit oder ein Potential durch die Haut gemessen [98], wobei entweder externer Strom oder der körpereigene Strom genutzt wird [46]. Für die Messungen können 2 Elektroden an der Hand oder am Fuß angebracht werden, z. B. an Daumen und Mittelfinger, zwischen denen in Folge eine Spannung beziehungsweise ein elektrischer Leitwert ermittelt wird [98]. Häufig werden Werte im Bereich von einigen Mikrosiemens (µS) erreicht [46].
Grundsätzlich kann damit die Feuchtigkeit der Haut gemessen werden, welche direkt mit der Aktivität der Schweißdrüsen zusammen hängt [46]. Schweißdrüsen, welche an Händen und Füßen besonders zahlreich vorkommen, werden vom ANS ausschließlich von sympathischen Nervenfasern innerviert [46, 49].

1.3.4 Biosignal Temperatur

Die Körpertemperatur kann mittels Temperatursensoren an verschiedenen Körperstellen gemessen werden. Die gängigen Einheiten dafür sind Kelvin (K) oder Grad Celsius (°C). Im klinischen Alltag werden rektale oder tympanale Messmethoden verwendet. In der Forschung werden Messungen an den Fingern oder auch im Gesicht angewendet. Reguliert wird der Wärmehaushalt des Körpers vor allem über den Hypothalamus und über hypothalamische Veränderungen des Sympathikotonus [39].

1.3.5 Biosignal EMG

Im EMG wird das Muskelaktionspotential und damit Muskelkontraktionen kleinster Art gemessen. Die Spannungsunterschiede zwischen einem repolarisierten Muskel und dessen durch Depolarisation hervorgerufenen Kontraktionen liegen meist im Bereich von wenigen Mikrovolt (µV). Häufig werden hierfür die Elektroden auf der Haut über dem M. trapezius [42] oder an Gesichtsmuskeln wie z.B. dem M. corrugator supercilii oder dem M. zygomaticus major [37] platziert. Invasive Messungen, bei denen die Elektroden direkt in den Muskel eingebracht werden, sind auch möglich. Eine erhöhte Muskelaktivität ist tendenziell mit einer vermehrten Sympathikus-Aktivität assoziiert [37]. Ebenso kann das EMG für die Emotionserkennung anhand der Mimik genutzt werden [75].

1.4 Einfluss von Stress auf Biosignal-Features

Vielfältig untersucht ist die Wirkung von mentalem Stress auf den Körper, wohingegen die Auswirkung von rein emotionalem Stress verhältnismäßig wenig Beachtung findet [12].
Akute Stressreaktionen können mit vielfältigen Features ermittelt werden. Genannt werden hier jene, die im Rahmen dieser Arbeit relevant sind.
Häufig werden Merkmale des EKG und daraus abgeleitete Features genutzt. Hierzu zählt, allen voran, die Herzfrequenz (HR), welche unter Stress meist erhöhte Werte zeigt [1, 5, 8, 15, 48, 55, 59, 67, 82, 92, 96, 102, 103, 116, 125]. Ähnliche Auswirkungen haben auch emotionale Zustände, wie Ärger und Angst [33, 56], wobei hier nicht immer signifikante Veränderungen festgestellt werden können [12].

Intervalle im EKG, wie Q-T, S-T und R-S, verkürzen sich unter Erregungszuständen [60, 120], ebenso das R-R-Intervall [66, 87, 92, 106, 107, 111, 123]. Dem gegenüber gibt es Hinweise auf zeitige QTc-Prolongationen unter Stress [5, 113]. Außerdem verkleinert sich unter mentalem Stress die Amplitude der T-Welle [18, 120].

Zusätzlich zu den klassischen EKG-Merkmalen sind auch HRV-Parameter sowohl zur Stressdetektion als auch zur Emotionsklassifikation beliebt [27]. Sie beschreiben die Variationen in den Zeitintervallen zwischen zwei Herzschlägen [1] und lassen sich in Time Domain, Frequency Domain und Nonlinear Features einteilen. Die Definitionen der nachfolgend genannten Features sind in den entsprechenden Tabellen aufgeführt (siehe Tabellen 4 und 5).

Bei den Time Domain Features zeigt sich unter Einfluss von kognitivem Stress selten die Standardabweichung der R-R Abstände (SDNN) erhöht [87, 96], manchmal können keine Korrelationen festgestellt werden [15, 106] und meist sind die Werte verringert [28, 51, 107, 111, 123]. Ebenso sind die quadratischen Mittelwerte aller Differenzen sukzessiver R-R-Intervalle (RMSSD) [1, 14, 28, 51, 87, 92, 107] und Prozentsätze der Anzahl an R-R-Intervallen, die mehr als 50ms auseinander liegen (pNN50) [1, 14, 15, 28, 51, 87, 92, 106, 107, 111] erniedrigt.

Im Bereich der Frequency Domain Features wird meist in das Low Frequency Band (LF: 0,04–0,15 Hz), welches Informationen über Sympathikus- und Parasympathikus-Aktivität gibt, und High Frequency Band (HF: 0,15–0,4 Hz), das nur parasympathische Informationen vermittelt, unterschieden [107, 110, 123]. Bei diesen Features sind manchmal die LF-Features [96, 114, 123] und selten HF-Features [96] erhöht und meist die LF-Features [1, 51, 107, 111, 123] und HF-Features [15, 45, 48, 51, 92, 107, 123] erniedrigt, ebenso wie die Total Power (tp) [111]. Bezüglich der LF/HF Ratio zeigen sich stark divergierende Ergebnisse. Einige Autoren können keine Veränderung unter Stress feststellen [96], andere beschreiben positive Korrelationen [15] und eine Erhöhung des Verhältnisses [14, 28, 45, 48, 66, 69, 87, 92, 114] und wieder andere beschreiben eine Verringerungen [51].

Die zu den Nonlinear Features gehörende SD1, SD2 und deren Verhältnis sind ebenfalls mögliche Features im Bereich der Stressforschung [13]. Das Feature SD2 kann unter Stresskonditionen reduzierte Werte zeigen [72].

Eine reduzierte HRV wird, neben mentalen Stresszuständen, auch mit emotionalen Erregungszuständen ,wie z.B. Ärger und Frustration, assoziiert [27, 99]. Spezifische Features hierfür sind eine reduzierte SDNN [40], RMSSD [40], LF und HF Werte [40]. Wobei die letzten beiden in ihrer Ausprägung variieren können [108].

Neben dem EKG können auch EMG-Features, z. B. des M. trapezius, als Indikator für Stressreaktionen herangezogen werden [42, 86]. Mentaler Stress führt hier zu erhöhten Mittelwerten der absoluten Werte (MAV) [1, 28, 67] und quadratischen Mittelwerten (RMS) [55, 61, 62, 128] der Muskelspannungsamplitude. Auch Healey et al. benutzen in ihrer Arbeit den MAV und die Varianz des EMG Signals [42]. Features aus dem Frequenz-Spektrum, wie der Mittelwert der Frequenzen und der Median der Frequenzen, zeigen unter mentaler Beanspruchung verringerte Werte [128]. Daneben kann auch emotionaler Stress zu einer Erhöhung der Muskelspannung führen [126]. Von Kim et al. wird gezeigt, dass EMG-Features linear mit Änderungen der Erregung von Emotionen korrelieren [52]. Entgegen dem berichten Ladakis et al., dass die Features der Muskelaktivität für sich genommen keine sichere Diskrimination ermöglichen [57].

Unter Stress verändert sich auch die Atmung. So werden reduzierte mittlere Atemfrequenzen infolge von Entspannung [52] und erhöhte Atemraten [36, 69, 116] und geatmete Volumen [36, 104] durch Stressexposition gemessen. Die Spannweite und Standardabweichung der erhobenen Atmungsdaten, sowie die mittlere Amplitude sind ebenfalls mögliche Features [77]. Healey et al. benutzen für ihre Studie unter anderem den Mittelwert und die Varianz des Atmungssignals [42].

Emotionale Bedingungen führen ebenfalls zu Veränderungen in diesen Features [32, 101], wie z. B. erhöhte Atemfrequenzen bei Ärger oder ähnlichen emotionalen Stresszuständen [7, 56, 95, 99, 104]. Egger et al. postulieren, dass die Atmung einer verärgerten Person tief und schnell ist und eine unregelmäßige Atmung Zeichen von negativer Wertigkeit und Erregung sind [27]. Auch andere Autoren beschreiben eine unregelmäßige Atmung als Zeichen von Stress-Bedingungen [36, 104]. Zu den Features des Biosignals Atmung, die für die Untersuchung von emotionalem Stress oder allgemein von Emotionen verwendet werden, zählen neben der Atemfrequenz, die Amplitude, die Mittelwerte, die Standardabweichungen, die Minima und die Maxima des Signals [99].

Durch ihren direkten Zusammenhang zum Sympathischen Nervensystem ist auch die EDA eine häufig verwendete Möglichkeit Stressreaktionen zu messen [83]. Mögliche Features sind die MAV [13, 30, 31, 42, 63, 73, 77, 83, 84, 97, 129], die Varianz [42] oder die Standardabweichung [30, 31, 63, 105], die Minima und die Maxima der Signalamplitude [13, 30, 31, 42, 97], aber auch die Frequenz der Spitzenwerte [97], der RMS [30, 121] und die Nulldurchgänge des Signals [63]. Dabei äußern sich unter mentalem Stress erhöhte Leitfähigkeiten durch erhöhte MAV der EDA [82, 105]. Ebenso kann sich emotionaler Stress, insbesondere Ärger und ähnliche Emotionen, auswirken [95, 99]. Auch bei der Erkennung dieser Zustände werden Features wie die MAV, die Standardabweichung [52] und die Spannweite des Biosignals [99], sowie weiterführende Features [52, 99] genutzt.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Biosignalen wird in einigen Arbeiten auch die Körpertemperatur gemessen. Die Entwicklung der Temperatur unter Stressbedingungen ist jedoch abhängig von der untersuchten Körperstelle [32, 122]. Giannakakis et al. berichten vorwiegend von Studien, bei denen die Temperatur am Finger unter Stresskonditionen gesunken ist [32]. Ähnliche Wirkungen zeigen sich auch unter emotionalen Bedingungen, wie Angst [27]. In solchen Studien werden Standard-Features wie die MAV und die Standardabweichung [13, 63, 85] oder Minima und Maxima [13, 53] genutzt. Diese Werte sinken vor allem unter emotionalen Stressbedingungen, wohingegen kognitive Aufgaben zum Teil keine Veränderungen hervorrufen [85]. Andere Autoren nutzen weiterführende Features, die z. B. die Neigung des Temperatursignals darstellen [129].

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass Untersuchungen zu Veränderungen in Biosignal-Features auf Grund von Stress vielfältig sind. Doch erscheinen die Untersuchungen zur Messbarkeit von emotionalem Stress, insbesondere im Vergleich zu kognitivem Stress anhand von Biosignalen bisher unzureichend.

1.5 Zielsetzung

In dieser Arbeit sollen aus biophysiologischen Signalen Merkmale herausgearbeitet werden, die der Stresserkennung dienen und eine Unterscheidung in Stress- und Nicht-Stress-Zustände ermöglicht. Auf Grund bisher mangelnder Ergebnisse in der Forschung liegt ein weiteres Augenmerk auf der Differenzierung zwischen emotionalem und mentalem Stress.
Es ist Ziel dieser Arbeit, folgende Hypothesen zu bearbeiten:

- Die Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen ist anhand von den Biosignalen EKG, Atmung, EDA, Temperatur und EMG mit ihren entsprechenden Features möglich.
- Die Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen ist anhand von den Biosignalen EKG, Atmung, EDA, Temperatur und EMG mit ihren entsprechenden Features möglich.
- Die Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress ist anhand von den Biosignalen EKG, Atmung, EDA, Temperatur und EMG mit ihren entsprechenden Features möglich.

Im Falle einer Bestätigung ist es außerdem Ziel dieser Arbeit, die entsprechenden relevanten Features herauszuarbeiten.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign und Versuchsablauf

Diese Arbeit basiert auf dem „uulmMAC“-Datensatz. Zur Generierung dieser multimodalen Daten wurden in einer Mensch-Maschinen-Interaktion verschiedene emotionale und mentale Zustände provoziert [41].

Bei den 60 Versuchspersonen, jeweils zur Hälfte männlichen und weiblichen Geschlechtes, handelt es sich um Medizinstudierende im Alter von 17–27 Jahren, welche über Informationstafeln auf dem Campus der Universität Ulm angeworben wurden. Alle Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil, die von der Ethikkomission der Universität Ulm im Rahmen des Projekts C4-SFB TRR62 anerkannt wurde [41].

Die Studienteilnehmenden wurden in 2 geschlechtlich ausbalancierte Gruppen unterteilt. 40 Versuchspersonen durchliefen das Experiment einmal, die restlichen 20 führten das Experiment insgesamt dreimal, jeweils im Abstand von einer Woche, durch [41]. Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit Daten ohne Wiederholungseffekte. Entsprechend wurden die Daten der ersten Gruppe und die Daten des ersten Durchganges der zweiten Gruppe verwendet.

Die Studie bestand aus einer Reihe von Spielen, bei denen die Testpersonen jeweils aus einer Menge von Objekten unterschiedlicher Farbe das Einzigartige hinsichtlich Form und Farbe identifizieren mussten. Verschiedene Schwierigkeitslevel wurden über die Vielfältigkeit der Objekte, Formen und Farben sowie über die verfügbare Zeit zum Lösen der Aufgabe generiert. Ein zusätzlicher Anreiz für die Teilnehmenden wurde geschaffen, indem sie für jede richtig gelöste Aufgabe einen gewissen Geldbetrag erhielten. Je schneller sie die Aufgabe lösten, desto höher war der Gewinn [41].

Über die Schwierigkeitslevel wurden 6 verschiede Sequenzen induziert. Diese waren durch je eine subjektive Bewertung der vorangegangenen Sequenz und eine kurze Ruhephase mit Zusammenfassung der Ergebnisse voneinander getrennt [41].

Die individuellen Bewertungen wurden im Rahmen der Auswertung des Experiments genutzt, um die Sequenzen hinsichtlich ihrer Wirkung zu validieren [41].

Jede Sequenz bestand aus jeweils 40 Einzelaufgaben. Begonnen wurde mit der Sequenz *Interest*, bei der die Spiele jeweils zwischen 9 und 16 Elemente enthielten und innerhalb von 10 Sekunden gelöst werden mussten. Im Anschluss kam die Sequenz *Overload* mit jeweils 36 Items und 6 Sekunden Zeit pro Spiel. Die folgende Sequenz *Normal* wurde als Referenzwert angesehen und bestand aus Spielen mit 16 Elementen und erneut 10 Sekunden Zeit zum Lösen der Aufgabe. Bei den darauf folgenden Sequenzen *Easy* und *Underload*, bestanden die Einzelaufgaben aus jeweils 9 Items mit 100 Sekunden Bearbeitungszeit. Die letzte Sequenz *Frustration* war identisch zur Sequenz *Interest*. Doch im Gegensatz zu dieser loggte die Maschine bewusst eine falsche Antwort ein, auch wenn die Versuchsperson eine korrekte Antwort gab [41].

Während die Versuchspersonen die Aufgaben lösten, wurden multimodale Daten über verschiedene Sensoren gewonnen.

Für diese Arbeit sind ausschließlich die biophysiologischen Daten, welche über einen g.tec g.MOBIlab+ Bluetooth Verstärker generiert wurden [41], von Bedeutung. Die Versuchspersonen waren mit Sensoren zur Erzeugung von EMG-, EKG-, EDA-, Atmungs- und Temperaturdaten ausgestattet. Elektromyografische Messungen wurden zum Teil an 3 verschiedenen Körperstellen durchgeführt: am M. trapezius, M. corrugator supercilii und M. zygomaticus. Die Messungen der letzten beiden Muskeln erfolgten ausschließlich in der zweiten Gruppe, während solche am M. trapezius in beiden Gruppen durchgeführt wurden. Sowohl die Temperaturdaten als auch die Daten der EDA wurden an den Händen der Studienteilnehmenden erfasst. Die EKG-Elektroden wurden im Sinne einer klassischen frontalen Ableitung ventral am Brustkorb befestigt und über einen Brustgürtel konnten die Atmungsdaten gewonnen werden [41].

Mittels der Simulink®software wurde online ein Qualitätscheck durchgeführt und im Anschluss an die Aufnahmen wurden die Daten nachbearbeitet, um eine möglichst hohe Qualität zu gewährleisten.

Letztendlich basiert der für diese Arbeit relevante Datensatz auf 95 Aufnahmen von 57 Versuchspersonen, da auf Grund von verloren gegangenen Biosignaldaten und technischen Fehlern 3 Teilnehmende ausgeschlossen wurden [41].

2.2 Verarbeitung der Biosignale

Da nicht alle der 6 Sequenzen für die Fragestellung dieser Arbeit relevant schienen, wurden 3 Sequenzen zur weiteren Verarbeitung ausgewählt. Die Sequenz *Normal* wurde auf Grund der Ergebnisse aus der Arbeit von Hazer-Rau et al. als Referenzwert beziehungsweise Baseline angesehen. Sowohl in den Self-Assessment Manikins, als auch bei den direkten Fragen lagen die Ergebnisse der Sequenz *Normal* jeweils im Mittelfeld im Vergleich zu den anderen Sequenzen [41]. Es wurde jeweils das Ausmaß der Wertigkeit (Valence), der Erregung (Arousal) und der Dominanz (Dominance) bestimmt. Zusätzlich wurden Fragen zur Einschätzung der Schwierigkeit, der eigenen Leistung, des empfundenen Stresslevels und der eigenen Motivation gestellt [41]. In anschließenden Tests zeigten sich signifikante Ergebnisse beim Vergleich der einzelnen Sequenzen untereinander bezüglich der erhobenen Einschätzungsdaten [41]. So waren die Unterschiede zwischen der Sequenz *Normal* und *Overload* signifikant, ebenso wie die meisten Tests zu den Unterschieden zwischen *Normal* und *Frustration* [41]. Neben der Sequenz *Normal* wurden für diese Arbeit die beiden Sequenzen *Overload* und *Frustration* als relevant angesehen. Beide Sequenzen zeigten, im Vergleich zu den anderen, die höchsten Werte im Bereich der Erregung und die niedrigsten bei der Wertigkeit und Dominanz [41]. Bei beiden Sequenzen wurden bei den Fragen nach dem Stressempfinden die höchsten Werte angegeben [41]. Entsprechend wurde angenommen, dass diese Sequenzen Stress induzierten. Die Sequenz *Overload* empfanden die Probanden im Durchschnitt als schwieriger [41], somit wurde hier von einer erhöhten mentalen Beanspruchung ausgegangen. Wohingegen bei der Sequenz *Frustration*, zusätzlich zu dem empfundenen Stress [41], eine emotionale Komponente durch den Versuchsaufbau in den Versuchspersonen ausgelöst wurde.

Entsprechend wurden im Verlauf dieser Arbeit nur die Daten aus diesen 3 Sequenzen weiter verarbeitet. Der Datensatz setzt sich aus den bereits zuvor geschnittenen, vorverarbeitet gefilterten und konvertierten Rohdaten der Biosignale EKG, EMG des M. trapezius, Atmung, EDA und Temperatur zusammen.

Diese Biosignale wurden, in 2 Gruppen unterteilt, bearbeitet. Kategoriebasiert wurden die Signale EMG, Atmung, EDA und Temperatur weiter verarbeitet. Hierfür

wurden aus den Rohdaten verschiedene Features berechnet und entsprechenden Kategorien zugeordnet. Bei diesen Features handelt es sich um solche, die in der Schmerzforschung von Gruss et al. verwendet wurden [38]. Die verwendeten Kategorien sind die Amplitude, Frequenz, Stationarität, Entropie, Linearität und Variabilität.

Diese kategoriebasierten Features wurden im Vornherein auch für die EKG-Daten berechnet. Aus medizinischer Perspektive waren diese Features für ein EKG jedoch nicht sinnvoll. Daher wurden die EKG-Daten signalbasiert verarbeitet. Hierfür wurden die Rohdaten mit der MATLAB Toolbox ecgFEAT [94] (siehe Abbildung 2) in der Software MATLAB R2018b (v9.5.0.944444, 64-bit) und der Software Kubios HRV Standard (Version 3.3.1, 64-bit) (siehe Abbildung 3) verarbeitet und daraus verschiedene EKG-spezifische Features berechnet. Zusätzlich dazu wurden wenige Features manuell aus anderen Features berechnet.

Im Anschluss wurden fehlerhafte Daten manuell und durch eine neuere Version der MATLAB Toolbox ecgFEAT korrigiert.



Abbildung 2: ecgFEAT Toolbox

Darstellung der Anwendung ecgFEAT zur Berechnung verschiedener EKG-Features. Abgebildet ist die Software bei der Analyse des EKGs einer Versuchsperson für eine Sequenz nach Einspeisung der EKG-Rohdaten. Das Programm gibt eine Auswahl möglicher Berechnungsoptionen vor und markiert optisch EKG-spezifische Punkte (oberste Abbildung). Je nach ausgewählten Berechnungsoptionen folgt eine Auflistung der berechneten Features unterteilt in Time-Features (mittlere Abbildung) und HRV-Features (untere Abbildung). Die Zahlenwerte können zur weiteren Verarbeitung tabellarisch in MATLAB exportiert werden. Detailliertere Erklärungen der Toolbox sind in [94] zu finden. Ulm, 2020. EKG: Elektrokardiogramm; HRV: Herzfrequenzvariabilität.

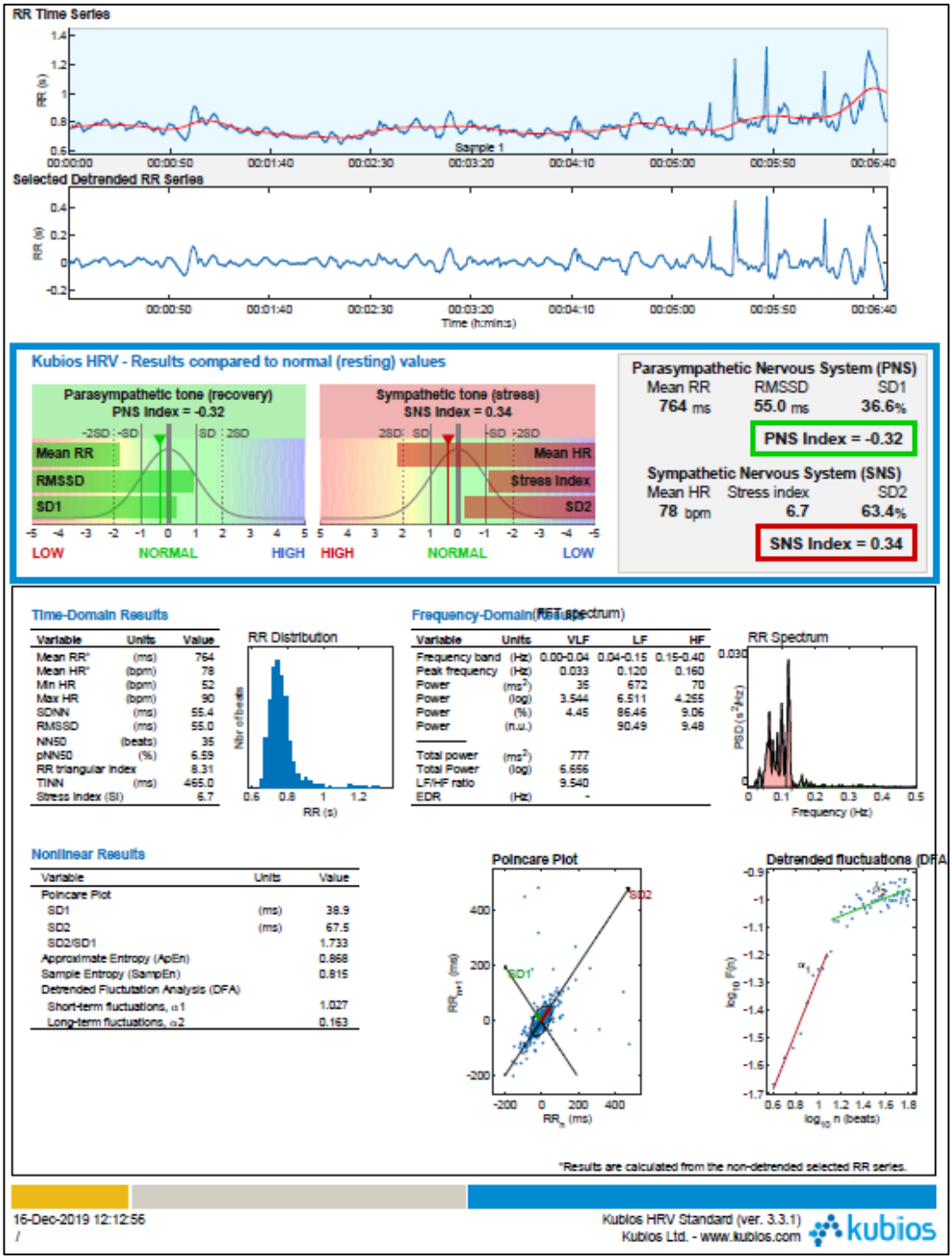

Abbildung 3: Kubios HRV Standard Toolbox

Darstellung der Ergebnisse der HRV-Analyse im Programm Kubios. Zur genaueren Erklärung der einzelnen Bereiche und Optionen siehe [109]. Ulm, 2019. HRV: Herzfrequenzvariabilität.

Nach der Berechnung aller genannten Features bestand der Datensatz aus 223 Features pro Person und Sequenz, zusammengesetzt aus 87 EKG-Features und 136 Kategorie-Features. Diese 136 Kategorie-Features gliederten sich wiederrum

in die 4 Biosignale EMG, EDA, Atmung und Temperatur mit jeweils 34 Features auf.

Die EKG-Features setzten sich aus mehreren Untergruppen zusammen. Dazu gehörten 25 Amplituden-Features, bestehend aus Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum und der Spannweite der Werte, jeweils für spezifische Merkmale im EKG (P-Welle, Q-, R- und S-Zacke und T-Welle). Hinzu kamen 35 Intervall-Features bestehend aus Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum und Spannweite, jeweils für das R-R- und P-R-Intervall, das P-R-Segment, den QRS-Komplex und die Q-T-, R-T- und S-T-Strecke. Die 2 QTc-Features wurden manuell nach den entsprechenden Formeln berechnet. Zur Verdeutlichung sind in der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 4) die wichtigsten Punkte und Strecken im EKG dargestellt.

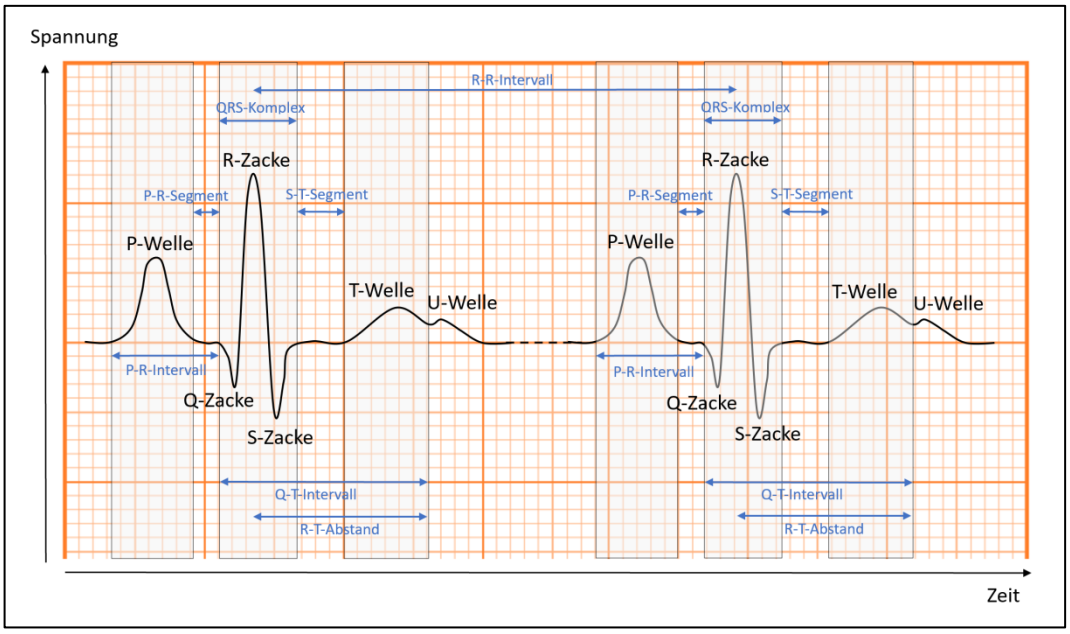

Abbildung 4: EKG-Merkmale

Darstellung eines EKGs mit Beschriftung der entsprechenden Wellen und Zacken, sowie den für diese Arbeit relevanten Intervallen, Segmenten und Strecken. Inhalte der Grafik aus [22]. Ulm, 2023. EKG: Elektrokardiogramm.

Bei den restlichen 25 EKG-Features handelte es sich um HRV-Features. Davon wurden 6 Time Domain Features mit der MATLAB Toolbox ecgFEAT berechnet. Im Zuge dessen wurden auch die entsprechenden Frequency Domain Features und Nonlinear Features erstellt. Nach Vergleich mit den Ergebnissen der Software Kubios wurden hier Diskrepanzen festgestellt. Daher wurde entschieden, die

Features der Frequency Domain und die Nonlinear Features mit der Software Kubios zu berechnen. Diese stellten die restlichen 19 EKG-Features dar.

2.3 Featureselektion

Die Menge an Features wurde im Anschluss zuerst manuell reduziert. Bei den EKG-Features wurden in den Untergruppen Amplitude und Intervalle jeweils nur die Mittelwerte für die weiteren Berechnungen übernommen, wohingegen in der Kategorie HRV alle Features weiter verarbeitet wurden. Somit reduzierten sich 87 EKG-Features auf 39 Features. Von den 136 kategoriebasierten Features wurden 10 aussortiert, da diese in der Berechnung jeweils Nullwerte zeigten. Damit wurde diese Gruppe auf 126 Features reduziert. Insgesamt bestand der Datensatz zu diesem Zeitpunkt aus 165 Features.
Im Anschluss wurde die Anzahl der Features um weitere 85 reduziert. Hierfür wurde die vorhandene Literatur zu diesem oder verwandten Themen genutzt. Weiter verwendet wurden nur solche Features, die in der Literatur Erwähnung fanden oder in dieser Arbeit berechneten Features vom Wesen her ähnelten. Zusätzlich wurden wenige Features eingeschlossen, die von ihrer physiologischen Bedeutung her relevant erschienen und solche ausgeschlossen, die sich entweder doppelten oder grundsätzlich die gleiche Tatsache widerspiegelten.
Ein Beispiel für Letzteres waren der R-R-Abstand und die Herzfrequenz, die nur durch eine einfache Gleichung ineinander umgewandelt werden können. Außerdem musste beispielsweise entschieden werden, ob mit dem P-R-Intervall oder -Segment gearbeitet werden sollte. Technisch ähnelte eher das P-R-Intervall dem P-Q-Intervall, das häufig im medizinischen Alltag bestimmt wird, daher wurde sich für dieses Feature entschieden. Ein ähnlicher Fall lag, bei der Entscheidung zwischen der frequenzkorrigierten QT-Zeit nach der Bazett-Formel oder der Fridericia-Formel vor. Da im medizinischen Kontext häufig die Bazett-Formel verwendet wird, wurde sich auch hier für eben diese entschieden.
Letztendlich bestand der Datensatz aus 80 Features. Aufgeteilt in kategoriebasierte und signalbasierte Features sind alle diese mit ihren zugehörigen Definitionen in den folgenden Tabellen (siehe Tabellen 1 bis 5) aufgelistet. Ausschließlich bei den signalbasierten Features sind 8 Features aufgelistet, welche in der weiteren Arbeit keine Beachtung finden. Diese sind

daran zu erkennen, dass ihnen jeweils keine Nummer zugeordnet ist. Der Vollständigkeit halber und zum besseren Verständnis sind sie dennoch aufgeführt. Alle der aufgeführten kategoriebasierten Features kommen, bis auf wenige Ausnahmen, jeweils bei den Biosignalen EDA, EMG, Atmung und Temperatur vor. Um im Laufe dieser Arbeit zu verdeutlichen, welches Feature genau gemeint ist, setzen sich die Feature-Namen aus mehreren Bestandteilen zusammen. An erster Stelle steht die spezifische Feature-Nummer, dann das zugehörige Biosignal (EKG, EDA, EMG, Resp für Atmung oder Temp für Temperatur). Zum Schluss folgt die Kategorie-Bezeichnung gefolgt vom Kürzel des Features.

Tabelle 1: Kategoriebasierte Features Teil 1

Auflistung der für diese Arbeit relevanten kategoriebasierten Features der Biosignale EMG, EDA, Atmung und Temperatur, eingeteilt in Kategorien (1. Spalte). In der 2. Spalte ist das jeweilige Kürzel des Feature-Namens und in der 3. Spalte sind die Feature-Nummern. Die Definitionen der Features sind jeweils in der 4. Spalte aufgeführt. Inhalte der Tabelle aus [37]. Ulm, 2022. EMG: Elektromyogramm; EDA: Elektrodermale Aktivität.

Kategorie	Feature	Nummer	Beschreibung
Amplitude (A)	PEAK	42, 76, 105, 134	Maximaler Wert des Signals
	P2P	43, 77, 106, 135	Differenz zwischen dem Mittelwert der lokalen Maxima und dem Mittelwert der lokalen Minima des Signals
	RMS	44, 78, 107, 136	Quadratischer Mittelwert
	MLocMaxV	45, 79, 108, 137	Mittelwert der lokalen Maxima
	MLocMinV	46, 80, 109, 138	Mittelwert der lokalen Minima
	P2PMLE	47, 81, 110, 139	MLocMaxV - MLocMinV
	MAV	48, 82, 111, 140	Mittelwert der absoluten Werte
	MAVFD	49, 83, 112, 141	Mittelwert der absoluten Werte der ersten Differenzen
	MAVFDN	50, 84, 113, 142	Mittelwert der absoluten Werte der ersten Differenzen des normalisierten Signals
	MAVSD	51, 85, 114, 143	Mittelwert der absoluten Werte der zweiten Differenzen
	MAVSDN	52, 86, 115, 144	Mittelwert der absoluten Werte der zweiten Differenzen des normalisierten Signals

Tabelle 2: Kategoriebasierte Features Teil 2

Auflistung der für diese Arbeit relevanten kategoriebasierten Features der Biosignale EMG, EDA, Atmung und Temperatur, eingeteilt in Kategorien (1. Spalte). In der 2. Spalte ist das jeweilige Kürzel des Feature-Namens und in der 3. Spalte sind die Feature-Nummern. Die Definitionen der Features sind jeweils in der 4. Spalte aufgeführt. Inhalte der Tabelle aus [37]. Ulm, 2022. EMG: Elektromyogramm; EDA: Elektrodermale Aktivität.

Kategorie	Feature	Nummer	Beschreibung
Frequenz (F)	zc	53, 145	Anzahl der Nulldurchgänge
	fmode	55, 147	Modus der Frequenzen
	bw	57, 149	Bandweite
	cf	58, 150	Zentrale Frequenz
	fmean	56, 87, 116, 148	Mittelwert der Frequenzen
	fmed	54, 146	Median der Frequenzen
Stationarität (S)	median	59, 88, 117, 151	Median der Grade der Stationaritäten aller Frequenzen
	WAM	60, 89, 118, 152	Gewichtetes arithmetisches Mittel der Grade der Stationaritäten aller Frequenzen
	AI	61, 90, 119, 153	Approximiertes Integral über die Grade der Stationaritäten aller Frequenzen
	AIW	62, 91, 120, 154	Approximiertes Integral über die Grade der gewichteten Stationaritäten aller Frequenzen
	me	63, 92, 121, 155	Standardabweichung der Mittelwerte
	sd	64, 93, 122, 156	Standardabweichung der Standardabweichungen
Entropie (E)	Aprox	65, 94, 123, 157	approximate entropy
	Sample	67, 96, 125, 159	sample entropy
	Fuzzy	66, 95, 124, 158	fuzzy entropy
	Shannon	68, 97, 126, 160	Shannon-Entropie
	Spectral	69, 98, 127, 161	Spektrale Entropie
Linearität (L)	ldf	70, 99, 128, 162	lag dependence functions
	pldf	71, 100, 129, 163	partial lag dependence functions

Tabelle 3: Kategoriebasierte Features Teil 3

Auflistung der für diese Arbeit relevanten kategoriebasierten Features der Biosignale EMG, EDA, Atmung und Temperatur, eingeteilt in Kategorien (1. Spalte). In der 2. Spalte ist das jeweilige Kürzel des Feature-Namens und in der 3. Spalte sind die Feature-Nummern. Die Definitionen der Features sind jeweils in der 4. Spalte aufgeführt. Inhalte der Tabelle aus [37]. Ulm, 2022. EMG: Elektromyogramm; EDA: Elektrodermale Aktivität.

Kategorie	Feature	Nummer	Beschreibung
Variabilität (V)	var	72, 101, 130, 164	Varianz
	std	73, 102, 131, 165	Standardabweichung
	r	74, 103, 132, 166	Spannweite
	ir	75, 104, 133, 167	Interquartilbereich

Tabelle 4: Signalbasierte Features Teil 1

Auflistung relevanter signalbasierter Features aus dem Biosignal EKG, eingeteilt in Kategorien (1. Spalte). In der 2. Spalte ist das jeweilige Kürzel des Feature-Namens und in der 3. Spalte die Feature-Nummern zu finden. Die Definitionen der Features sind jeweils in der letzten Spalte aufgeführt. Inhalte der Tabelle aus [94, 109]. Ulm, 2022. EKG: Elektrokardiogramm.

Kategorie	Feature	Nummer	Beschreibung
Amplitude (A)	P_mean	3	durchschnittliche Amplitude der P-Welle in mV
	Q_mean		durchschnittliche Amplitude der Q-Zacke in mV
	R_mean		durchschnittliche Amplitude der R-Zacke in mV
	S_mean		durchschnittliche Amplitude der S-Zacke in mV
	T_mean	7	durchschnittliche Amplitude der T-Welle in mV
Intervall (I)	RR_mean		durchschnittlicher R-R-Abstand in ms
	PRint_mean	9	durchschnittliche Strecke des P-R-Abstandes (von Anfang P-Welle bis Beginn Q-Zacke) in mV
	PRseg_mean		durchschnittliche Strecke des P-R-Abstandes (von Ende P-Welle bis Beginn Q-Zacke) in mV
	QRS_mean		durchschnittliche Breite des QRS-Komplexes
	QT_mean	12	durchschnittliche Strecke des Q-T-Intervalls (Beginn Q-Zacke bis Ende T-Welle) in mV
	RT_mean	13	durchschnittliche Strecke des R-T-Intervalls (von R-Zacke bis Ende T-Welle) in mV
	ST_mean	14	durchschnittliche Strecke des S-T-Segments (Ende S-Zacke bis Beginn T-Welle) in mV
	QTc(bX)	40	frequenzkorrigierte QT-Zeit nach Bazett-Formel
	Qtc(fX)		frequenzkorrigierte QT-Zeit nach Fridericia-Formel

Tabelle 5: Signalbasierte Features Teil 2

Auflistung relevanter signalbasierter Features aus dem Biosignal EKG, eingeteilt in Kategorien (1. Spalte). In der 2. Spalte ist das jeweilige Kürzel des Feature-Namens und in der 3. Spalte die Feature-Nummern zu finden. Die Definitionen der Features sind jeweils in der letzten Spalte aufgeführt. Inhalte der Tabelle aus [94, 109]. Ulm, 2022. EKG: Elektrokardiogramm.

Kategorie	Feature	Nummer	Beschreibung
hrv	meanRR	15	durchschnittlicher R-R-Abstand in ms, Time Domain
	HR		Herzfrequenz =60/R-R-Abstand, Time Domain
	SDNN	17	Standardabweichung der R-R-Abstände, Time Domain
	RMSSD	18	Quadratischer Mittelwert aller Differenzen sukzessiver R-R-Intervalle, Time Domain
	NN50	19	Anzahl der R-R-Intervalle, die mehr als 50ms auseinander liegen, Time Domain
	pNN50	20	Prozentsatz aus NN50, Time Domain
	peak_VLF	21	Spitzenfrequenz für very low frequency band (Hz)
	peak_LF	22	Spitzenfrequenz für low frequency band (Hz)
	peak_HF	23	Spitzenfrequenz für high frequency band (Hz)
	ap_VLF	24	absolute Leistung des very low frequency bands (ms^2)
	ap_LF	25	absolute Leistung des low frequency bands (ms^2)
	ap_HF	26	absolute Leistung des high frequency bands (ms^2)
	apl_VLF	27	absolute Leistung des very low frequency bands (log)
	apl_LF	28	absolute Leistung des low frequency bands (log)
	apl_HF	29	absolute Leistung des high frequency bands (log)
	rp_VLF	30	relative Leistung des very low frequency bands (%)
	rp_LF	31	relative Leistung des low frequency bands (%)
	rp_HF	32	relative Leistung des high frequency bands (%)
	np_LF	33	Leistung von low frequency band in normalisierter Form (n.u.)
	np_HF	34	Leistung von high frequency band in normalisierter Form (n.u.)
	tp	35	Gesamtspektralleistung (ms^2)
	LFHF ratio	36	Verhältnis zwischen LF und HF Leistung
	SD1, SD2	37, 38	Standard Deviation 1 und 2 des Poincaré plot (ms)
	SD2SD1ratio	39	Verhältnis von SD2 zu SD1

2.4 Statistische Analyse

Alle statistischen Berechnungen wurden mit der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics (Version 25, 64-bit) durchgeführt. Es wurden die Daten der 80 Features bei einer Grundgesamtheit (N)=57 verwendet. Das Signifikanzniveau wurde mit α=0,05 festgelegt. Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse wurden auf 4, die Effektstärken auf 2 und alle sonstigen Ergebnisse auf 3 Nachkommastellen gerundet.

Vor der weiteren Verarbeitung wurden die Daten auf Fehler bei der Dateneingabe und fehlende Daten geprüft.

Im Rahmen der deskriptiven Analyse wurden allgemeine Lageparameter, wie z. B. Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum und Konfidenzintervall für jedes Feature, jeweils für die 3 Sequenzen *Normal*, *Overload* und *Frustration* einzeln, berechnet. Im Rahmen dessen wurden die Daten zusätzlich auf Ausreißer untersucht und auf Normalverteilung getestet.

Zu Beginn der weiterführenden statistischen Betrachtungen wurde zur weiteren Selektion für jedes Feature ein Friedman-Test durchgeführt. Im Falle signifikanter Ergebnisse wurden paarweise Vergleiche mittels Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche durchgeführt und die Effektstärke mittels des Korrelationskoeffizienten (r) nach Pearson berechnet. Die Berechnung erfolgte hierbei mittels der Formel $r=|\frac{z}{\sqrt{n}}|$. Wobei z für den ausgegebenen Teststatistikwert und n für die Stichprobengröße steht. Die Beurteilung der Effektgröße wurde nach der Einteilung von Cohen [16] vorgenommen.

Im Anschluss folgte eine Rangkorrelationsanalyse nach Spearman. Diese wurde für all jene Features berechnet, die im Friedman Test ein statistisch signifikantes Ergebnis erzielten.

Zuletzt wurde für die in der Korrelationsanalyse bereits verwendeten Features eine Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung durchgeführt. Auch hier wurde jedes Feature einzeln getestet. Dabei wurde zunächst auf Sphärizität geprüft. Kam es zu Verletzung der Sphärizität, so wurde bei einem Epsilon (ε)> 0,75 eine Korrektur nach Huynh-Feldt und bei einem ε<0,75 eine Greenhouse-Geisser-Korrektur angewandt. Ergab die entsprechende Varianzanalyse ein signifikantes Ergebnis, wurde die Effektstärke mit $f=\sqrt{\frac{\eta^2}{1-\eta^2}}$ nach Cohen [17] berechnet und

beurteilt. Hierbei steht η_p^2 für das vom Statistikprogramm bei der Varianzanalyse ausgegebene partielle Eta-Quadrat. Im Anschluss folgten Post-hoc-Analysen mit Bonferroni-Korrektur, bei denen auf die jeweiligen Unterschiede zwischen den einzelnen Sequenzen getestet wurde. Im Falle nicht signifikanter Ergebnisse der Varianzanalyse entfielen die beiden zuletzt genannten Schritte.

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik und weitere Selektion

Dieser Abschnitt befasst sich mit den allgemeinen deskriptiven Daten der vorausgewählten Features. Die genauen Werte können den jeweiligen Tabellen im Anhang entnommen werden.

Bezogen auf das Biosignal EKG zeigt am häufigsten die Sequenz *Overload*, gefolgt von *Frustration*, die höchsten Mittelwerte. Nur bei 4 der Features sind die Werte der Sequenz *Normal* am höchsten. In den meisten Fällen liegt keine Normalverteilung vor (siehe Anhang A1).

Zur besseren Veranschaulichung der Daten werden für die Features jeweils die Sequenzmittelwerte miteinander verglichen. Da sich diese in Einheit und Dimension erheblich unterschieden, wurden die prozentualen Unterschiede berechnet. Hierbei wurde der Sequenz *Normal* als Ausgangswert der Wert 100 % zugeordnet. In Bezug darauf wurden von den Sequenzen *Overload* und *Frustration* die jeweiligen prozentualen Werte berechnet.

Bei dem Biosignal EKG kommt im Folgenden zur Darstellung, dass die insgesamt höchsten Mittelwerte in der Sequenz *Frustration* erreicht werden. Bei den meisten Features zeigt die Sequenz *Overload* die höchsten Mittelwerte. Die Unterschiede zu den anderen beiden Sequenzen häufig nur sehr gering (siehe Abbildung 5).

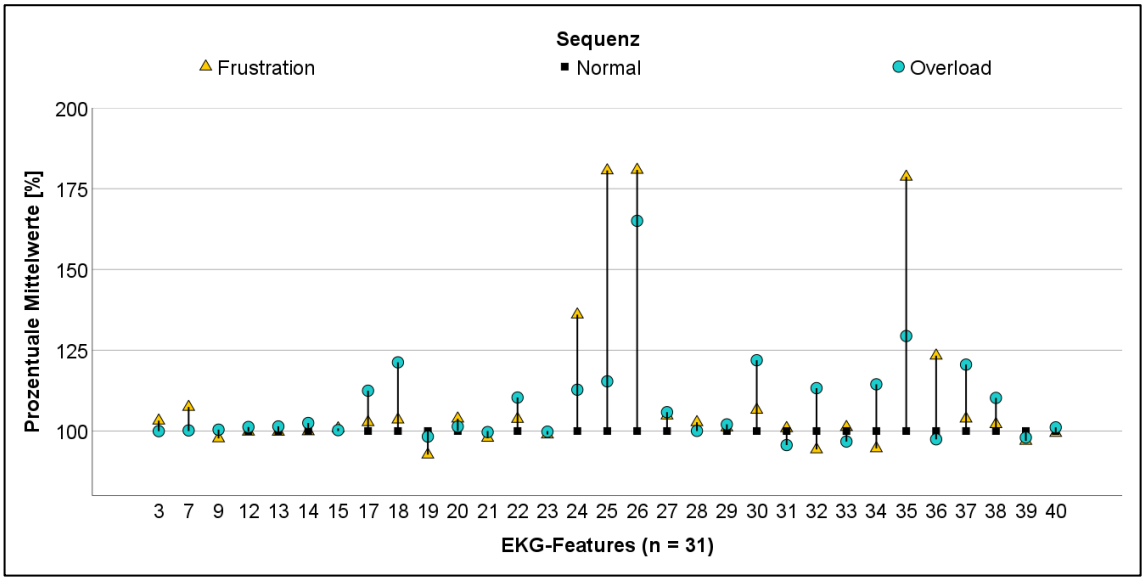

Abbildung 5: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EKG

Darstellung der EKG-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 4 und 5 zu finden sind. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede der prozentualen Mittelwerte zur Darstellung. Die Unterscheidung der 3 Sequenzen wird über die Symbole vorgenommen, wobei das rote Dreieck für die Sequenz *Frustration* steht, sowie der blaue Kreis für *Overload*. Die Sequenz *Normal* ist mit einem schwarzen Quadrat gekennzeichnet. Letzteres Symbol befindet sich immer auf der 100 %-Geraden, auch wenn es durch andere Symbole verdeckt ist. Ulm, 2019/20. n: Anzahl der verwendeten Features; EKG: Elektrokardiogramm.

Die Features des Biosignals Atmung zeigen in der Hälfte der Fälle in der Sequenz *Frustration* erhöhte Mittelwerte, gefolgt von der Sequenz *Overload*. Wenige Messwerte weisen eine Normalverteilung auf (siehe Anhang A2).

Zur besseren Veranschaulichung wurden auch bei diesem Biosignal die Daten der Sequenzmittelwerte der Features jeweils miteinander verglichen. Auch hier wurden die prozentualen Unterschiede berechnet.

Hierbei bestätigt sich, dass entweder die Sequenz *Frustration*, oder die Sequenz *Overload* die höchsten Mittelwerte aufweisen. Jedoch wird deutlich, dass die Unterschiede im Vergleich zu den anderen beiden Sequenzen oft nur gering ausfallen, wenn die Sequenz *Frustration* das Maximum bildet. Wohingegen bei der Sequenz *Overload* die Unterschiede meist deutlicher ausgeprägt sind (siehe Abbildung 6).

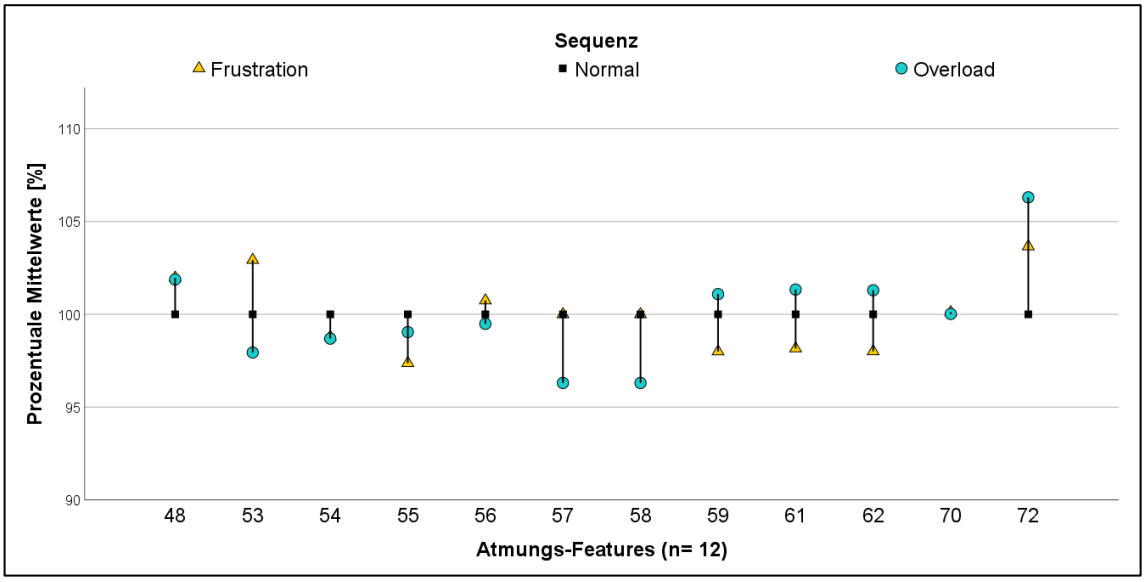

Abbildung 6: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals Atmung

Darstellung der Atmungs-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede der prozentualen Mittelwerte zur Darstellung. Die Unterscheidung der 3 Sequenzen wird über die Symbole vorgenommen, wobei das rote Dreieck für die Sequenz *Frustration* steht, sowie der blaue Kreis für *Overload*. Die Sequenz *Normal* ist mit einem schwarzen Quadrat gekennzeichnet. Letzteres Symbol befindet sich immer auf der 100 %-Geraden, auch wenn es durch andere Symbole verdeckt ist. Ulm, 2019/20. n: Anzahl der verwendeten Features.

Die Sequenz *Frustration* zeigt, bis auf wenige Ausnahmen, auch bei dem Biosignal EDA die höchsten Mittelwerte. Die meisten Messwerte sind nicht normalverteilt (siehe Anhang A3). Auch hier wurden die Daten der Sequenzmittelwerte der Features jeweils miteinander verglichen, ebenfalls über die prozentualen Unterschiede.

Die Darstellung bestätigt, dass die höchsten Werte in der Sequenz *Frustration* vorkommen. Bei einigen Features zeigen sich deutliche Unterschiede zu den anderen beiden Sequenzen (siehe Abbildung 7).

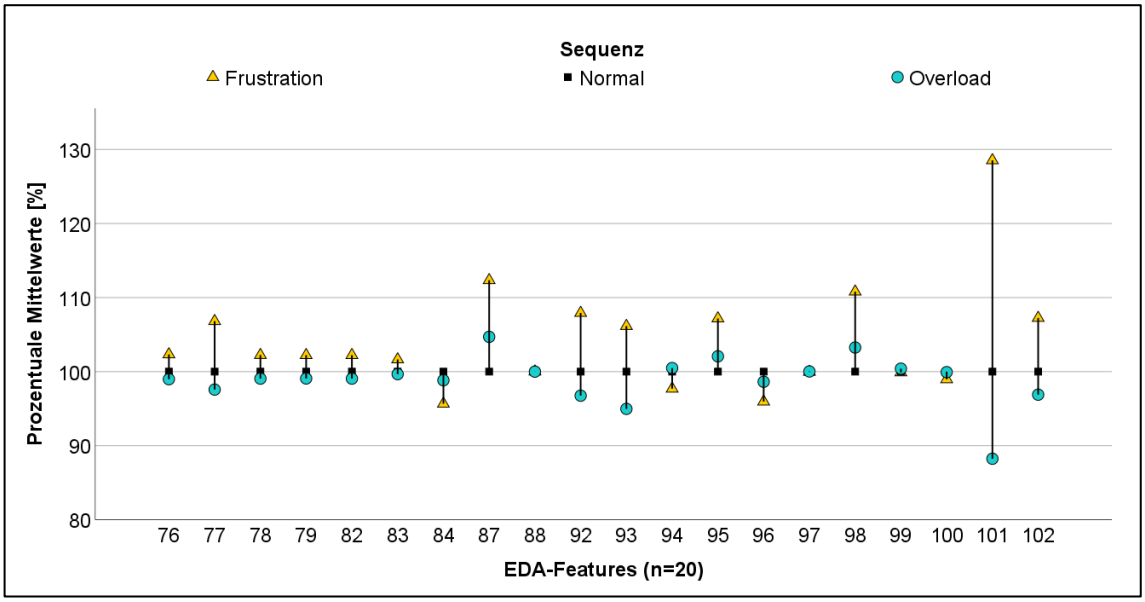

Abbildung 7: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EDA

Darstellung der EDA-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede der prozentualen Mittelwerte zur Darstellung. Die Unterscheidung der 3 Sequenzen wird über die Symbole vorgenommen, wobei das rote Dreieck für die Sequenz *Frustration* steht und der blaue Kreis für *Overload.* Die Sequenz *Normal* ist mit einem schwarzen Quadrat gekennzeichnet. Letzteres Symbol befindet sich immer auf der 100 %-Geraden, auch wenn es durch andere Symbole verdeckt ist. Ulm, 2019/20. n: Anzahl der verwendeten Features; EDA: Elektrodermale Aktivität.

Die Mittelwerte des Biosignals Temperatur sind hauptsächlich in der Sequenz *Frustration* am höchsten, nur bei 2 Features sind die Werte der Sequenz *Overload* im Durchschnitt höher. Der Großteil der Messwerte ist nicht normalverteilt (siehe Anhang A4). Wie auch bei den Biosignalen zuvor wurden hier die Daten der Sequenzmittelwerte der Features jeweils miteinander verglichen. Dies geschah ebenfalls über die prozentualen Unterschiede.

Bei dem Biosignal Temperatur zeigen die meisten ausgewählten Features zwischen den Sequenzen deutliche Unterschiede (siehe Abbildung 8).

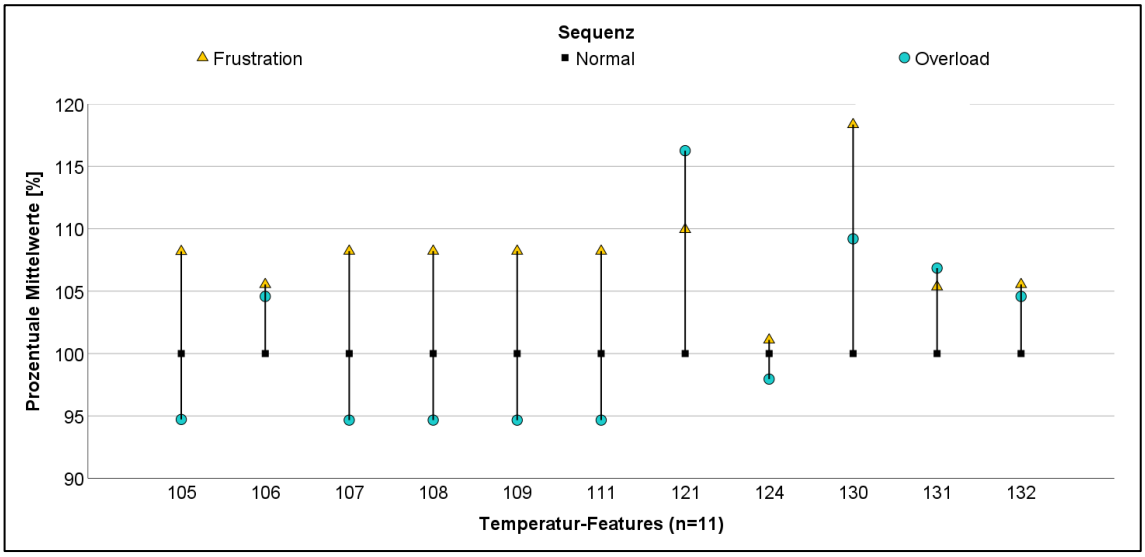

Abbildung 8: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals Temperatur

Darstellung der Temperatur-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede der prozentualen Mittelwerte zur Darstellung. Die Unterscheidung der 3 Sequenzen wird über die Symbole vorgenommen, wobei das rote Dreieck für die Sequenz *Frustration* steht, sowie der blaue Kreis für *Overload*. Die Sequenz *Normal* ist mit einem schwarzen Quadrat gekennzeichnet. Letzteres Symbol befindet sich immer auf der 100 %-Geraden, auch wenn es durch andere Symbole verdeckt ist. Ulm, 2019/20. n: Anzahl der verwendeten Features.

Bei dem Biosignal EMG sind meist die Mittelwerte der Sequenz *Normal* am höchsten, nur bei 3 Features sind die Mittelwerte in der Sequenz *Frustration* am höchsten. Die Messwerte des Features sind nicht normalverteilt (siehe Anhang A5). Auch bei dem Letzten der 5 Biosignale wurde eine Abbildung zur besseren Darstellung der Unterschiede der Mittelwerte erstellt. Dies geschah ebenfalls über die prozentualen Mittelwerte.

Es bestätigt sich, dass die Mittelwerte der Sequenz *Normal* meist am höchsten sind. Bei den 3 Features, bei welchen die Sequenz *Frustration* die höchsten Mittelwerte zeigt, sind die Unterschiede zwischen den jeweiligen Sequenzen sehr gering (siehe Abbildung 9).

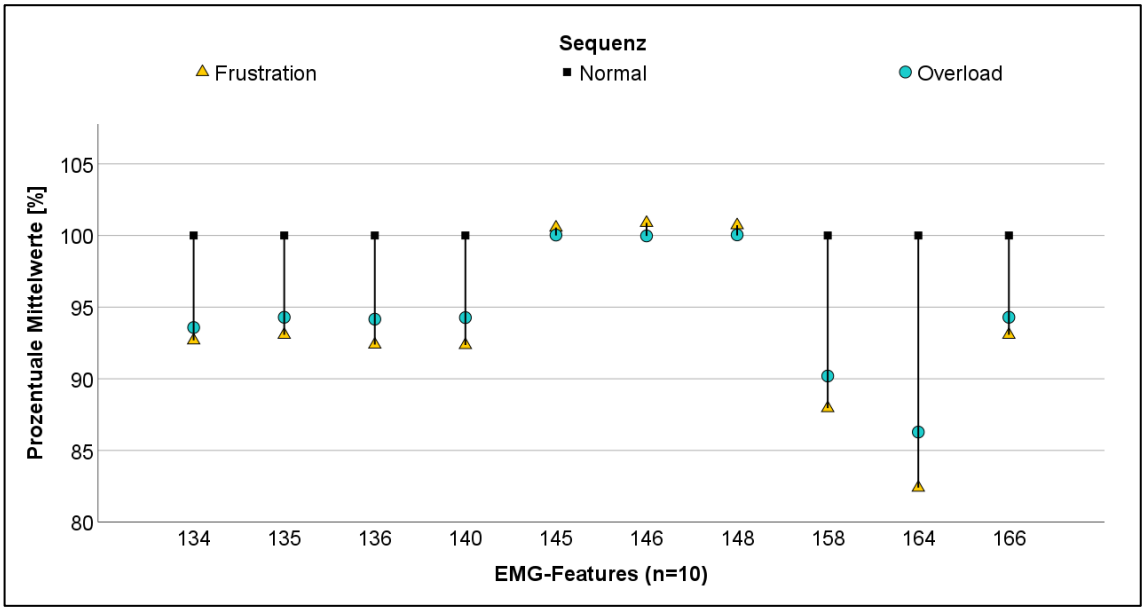

Abbildung 9: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EMG

Darstellung der Temperatur-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede der prozentualen Mittelwerte zur Darstellung. Die Unterscheidung der 3 Sequenzen wird über die Symbole vorgenommen, wobei das rote Dreieck für die Sequenz *Frustration* steht, sowie der blaue Kreis für *Overload*. Die Sequenz *Normal* ist mit einem schwarzen Quadrat gekennzeichnet. Letzteres Symbol befindet sich immer auf der 100 %-Geraden, auch wenn es durch andere Symbole verdeckt ist. Ulm, 2019/20. n: Anzahl der verwendeten Features; EMG: Elektromyogramm.

Bei der zusätzlichen Analyse der Werteverteilung fallen bei einigen Features Ausreißer auf. Vor allem bei den EKG-Features liegen viele extreme Werte vor. Da der Ausschluss dieser Werte zu einer starken Reduktion der Grundgesamtheit führen würde, werden die Werte beibehalten und als natürliche Variabilität angesehen.

3.2 Friedman-Test

Der Friedman-Test wurde berechnet, da es sich bei den Daten um abhängige Stichproben handelt. Er dient dem Testen der zentralen Tendenzen auf Unterschiede. In diesem Fall zwischen den einzelnen Sequenzen *Overload*, *Normal* und *Frustration*, jeweils bezogen auf das zugehörige Feature. Sortiert sind die Features in dieser Arbeit nach dem jeweils zugehörigen Biosignal, beginnend mit dem EKG.

Tabelle 6: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EKG Teil 1

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal EKG mit Auflistung der EKG-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Bei ihnen wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. EKG: Elektrokardiogramm; p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

Feature	**Friedman-Test**	
3_ECG_A_P_mean	$\chi^2(2)=8{,}842$ (p=0,012)	
Normal - Frustration z=-0,421; $p_{angepasst}$=0,074	Overload - Normal z=0,105; $p_{angepasst}$=1,000	Overload – Frustration z=-0,526; $p_{angepasst}$=0,015; r_F =0,07
7_ECG_A_T_mean	$\chi^2(2)=8{,}316$ (p=0,016)	
Normal - Frustration z=-0,368; $p_{angepasst}$=0,148	Overload - Normal z=0,158; $p_{angepasst}$=1,000	Overload – Frustration z=-0,526; $p_{angepasst}$=0,015; r_F =0,07
9_ECG_I_PRint_mean	$\chi^2(2)=8{,}316$ (p=0,016)	
Frustration - Normal z=0,368; $p_{angepasst}$=0,148	Normal - Overload z=-0,158; $p_{angepasst}$=1,000	Frustration – Overload z=0,526; $p_{angepasst}$=0,015; r_F =0,07
12_ECG_I_QT_mean	$\chi^2(2)=9{,}509$ (p=0,009)	
Normal – Frustration z=-0,018; $p_{angepasst}$=1,000	Normal – Overload z=-0,509; $p_{angepasst}$=0,02; r_F =0,07	Frustration – Overload z=0,491; $p_{angepasst}$=0,026; r_F =0,07
13_ECG_I_RT_mean	$\chi^2(2)=6{,}772$ (p=0,034)	
Normal - Frustration z=-0,035; $p_{angepasst}$=1,000	Normal - Overload z=-0,439; $p_{angepasst}$=0,058	Frustration - Overload z=0,404; $p_{angepasst}$=0,094
14_ECG_I_ST_mean	$\chi^2(2)=9{,}404$ (p=0,009)	
Normal – Frustration z=-0,175; $p_{angepasst}$=1,000	Normal – Overload z=-0,561; $p_{angepasst}$=0,008; r_F =0,07	Frustration - Overload z=0,386; $p_{angepasst}$=0,118

Tabelle 7: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EKG Teil 2

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal EKG mit Auflistung der EKG-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Bei ihnen wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. EKG: Elektrokardiogramm; p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

15_ECG_hrv_meanRR	$\chi^2(2)=4{,}667$ (p=0,097)	
17_ECG_hrv_SDNN	$\chi^2(2)=1{,}719$ (p=0,423)	
18_ECG_hrv_RMSSD	$\chi^2(2)=1{,}684$ (p=0,431)	
19_ECG_hrv_NN50	$\chi^2(2)=3{,}461$ (p=0,177)	
20_ECG_hrv_pNN50	$\chi^2(2)=0{,}982$ (p=0,612)	
21_ECG_hrv_peak_VLF	$\chi^2(2)=1{,}449$ (p=0,484)	
22_ECG_hrv_peak_LF	$\chi^2(2)=4{,}918$ (p=0,086)	
23_ECG_hrv_peak_HF	$\chi^2(2)=2{,}854$ (p=0,24)	
24_ECG_hrv_ap_VLF	$\chi^2(2)=4{,}667$ (p=0,097)	
25_ECG_hrv_ap_LF	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
26_ECG_hrv_ap_HF	$\chi^2(2)=0{,}246$ (p=0,884)	
27_ECG_hrv_apl_VLF	$\chi^2(2)=4{,}667$ (p=0,097)	
28_ECG_hrv_apl_LF	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
29_ECG_hrv_apl_HF	$\chi^2(2)=0{,}246$ (p=0,884)	
30_ECG_hrv_rp_VLF	$\chi^2(2)=10{,}667$ (p=0,005)	
Normal – Frustration z=-0,070; $p_{angepasst}$=1,000	Normal - Overload z=-0,561; $p_{angepasst}$=0,008; r_F =0,07	Frustration – Overload z=0,491; $p_{angepasst}$=0,026; r_F =0,07
31_ECG_hrv_rp_LF	$\chi^2(2)=2{,}772$ (p=0,25)	
32_ECG_hrv_rp_HF	$\chi^2(2)=3{,}263$ (p=0,196)	
33_ECG_hrv_np_LF	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
34_ECG_hrv_np_HF	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
35_ECG_hrv_tp	$\chi^2(2)=1{,}719$ (p=0,423)	
36_ECG_hrv_LFHF ratio	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
37_ECG_hrv_SD1	$\chi^2(2)=1{,}684$ (p=0,431)	
38_ECG_hrv_SD2	$\chi^2(2)=3{,}895$ (p=0,143)	
39_ECG_hrv_SD2SD1ratio	$\chi^2(2)=0{,}877$ (p=0,645)	
40_ECG_I_QTc(bX)	$\chi^2(2)=4{,}351$ (p=0,114)	

Die Effektstärken aller signifikanten Sequenzunterschiede liegen unterhalb von 0,1 und sind damit sehr klein.

Die EKG-Features mit statistisch signifikanten Sequenzunterschieden sind in der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 10) dargestellt. Darin wird anhand der Signifikanzwerte grafisch gezeigt, zwischen welchen Sequenzen signifikante

Unterschiede bestehen. Balken, die unter der 0,05-Linie enden, stellen signifikante Sequenzunterschiede dar.

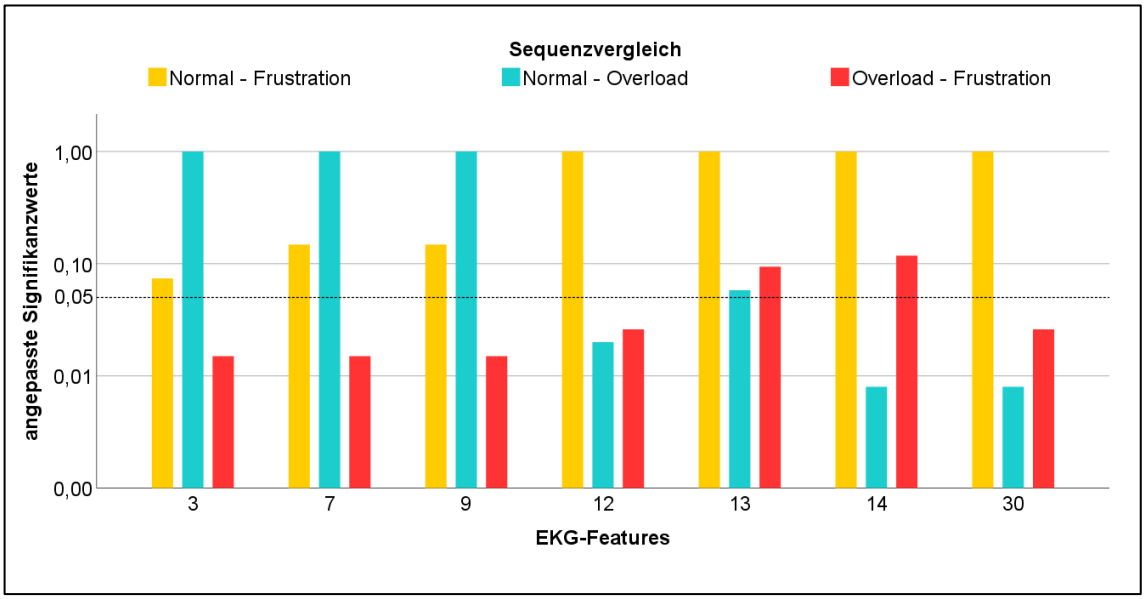

Abbildung 10: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal EKG

Darstellung der EKG-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 4 und 5 zu finden sind. Diesen Features sind jeweils 3 Balken zugeordnet, wobei der gelbe für den Sequenzunterschied zwischen *Normal* und *Frustration* steht, der blaue für den Unterschied zwischen *Normal* und *Overload* und der rote für den Unterschied zwischen *Overload* und *Frustration*. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede auf einer logarithmischen Skala durch die angepassten Signifikanzwerte zur Darstellung. Ulm, 2021. EKG: Elektrokardiogramm.

Das Biosignal Atmung weist 3 Features auf, bei denen statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden können (siehe Tabelle 8). Auch hier liegen die Effektstärken unter 0,1 und sind somit sehr gering.

Tabelle 8: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Atmung

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal Atmung mit Auflistung der Atmungs-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Bei ihnen wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind rot hinterlegt. Ulm, 2021. p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

Feature	**Friedman-Test**	
48_Resp_A_MAV	$\chi^2(2)=2,0$ (p=0,368)	
53_Resp_F_zc	$\chi^2(2)=4,105$ (p=0,128)	
54_Resp_F_fmed	$\chi^2(2)=0,316$ (p=0,854)	
55_Resp_F_fmode	$\chi^2(2)=1,298$ (p=0,523)	
56_Resp_F_fmean	$\chi^2(2)=0,421$ (p=0,810)	
57_Resp_F_bw	$\chi^2(2)=3,263$ (p=0,196)	
58_Resp_F_cf	$\chi^2(2)=3,263$ (p=0,196)	
59_Resp_S_median	$\chi^2(2)=7,825$ (p=0,020)	
Frustration – Normal z=0,404; $p_{angepasst}$=0,094	Normal – Overload z=-0,088; $p_{angepasst}$=1,000	Frustration – Overload z=0,491; $p_{angepasst}$=0,026; r_F=0,07
61_Resp_S_AI	$\chi^2(2)=8,842$ (p=0,012)	
Frustration – Normal z=0,421; $p_{angepasst}$=0,074	Normal – Overload z=-0,105; $p_{angepasst}$=1,000	Frustration – Overload z=0,526; $p_{angepasst}$=0,015; r_F =0,07
62_Resp_S_AIW	$\chi^2(2)=8,667$ (p=0,013)	
Frustration – Normal z=0,439; $p_{angepasst}$=0,058	Normal – Overload z=-0,070; $p_{angepasst}$=1,000	Frustration – Overload z=0,509; $p_{angepasst}$=0,020; r_F =0,07
70_Resp_F_cf	$\chi^2(2)=0,246$ (p=0,884)	
72_Resp_V_var	$\chi^2(2)=0,877$ (p=0,645)	

Features mit statistisch signifikanten Sequenzunterschieden sind in der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 11) dargestellt. Bei allen 3 Features sind ausschließlich die Unterschiede zwischen den Sequenzen *Overload* und *Frustration* signifikant.

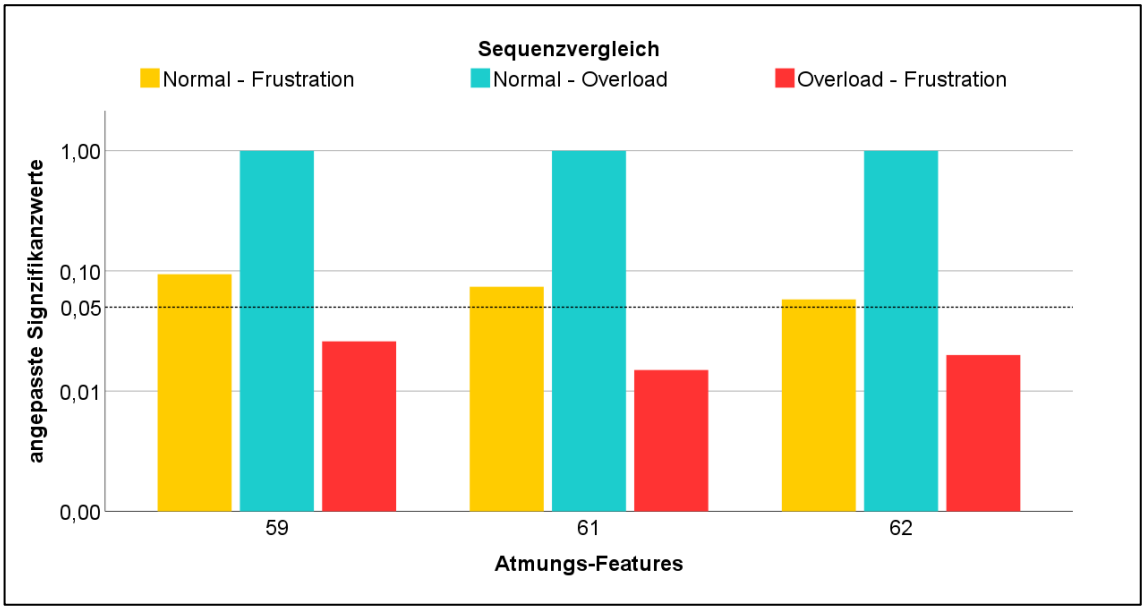

Abbildung 11: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal Atmung

Darstellung der Atmungs-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Diesen Features sind jeweils 3 Balken zugeordnet, wobei der gelbe für den Sequenzunterschied zwischen *Normal* und *Frustration* steht, der blaue für den Unterschied zwischen *Normal* und *Overload* und der rote für den Unterschied zwischen *Overload* und *Frustration*. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede auf einer logarithmischen Skala durch die angepassten Signifikanzwerte zur Darstellung. Ulm, 2021.

Bei dem Biosignal EDA können 2 Features identifiziert werden, welche signifikante Unterschiede aufweisen (siehe Tabelle 9). Diese zeigen ebenfalls Effektstärken unter 0,1 und damit sehr geringe Effekte.

Tabelle 9: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EDA

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal EDA mit Auflistung der EDA-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Bei ihnen wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. EDA: Elektrodermale Aktivität; p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

Feature	**Friedman-Test**	
76_EDA_A_PEAK	$\chi^2(2)=0{,}456$ (p=0,796)	
77_EDA_A_P2P	$\chi^2(2)=5{,}930$ (p=0,052)	
78_EDA_A_RMS	$\chi^2(2)=0{,}982$ (p=0,612)	
79_EDA_A_MLocMaxV	$\chi^2(2)=0{,}982$ (p=0,612)	
82_EDA_A_MAV	$\chi^2(2)=0{,}982$ (p=0,612)	
83_EDA_A_MAVFD	$\chi^2(2)=4{,}105$ (p=0,128)	
84_EDA_A_MAVFDN	$\chi^2(2)=0{,}737$ (p=0,692)	
87_EDA_F_fmean	$\chi^2(2)=8{,}667$ (p=0,013)	
Normal – Frustration z=-0,544; $p_{angepasst}$=0,011; r_F=0,07	Normal – Overload z=-0,193; $p_{angepasst}$=0,909	Overload – Frustration z=-0,351; $p_{angepasst}$=0,183
88_EDA_S_median	$\chi^2(2)=3{,}263$ (p=0,196)	
92_EDA_S_me	$\chi^2(2)=2{,}211$ (p=0,331)	
93_EDA_S_sd	$\chi^2(2)=2{,}842$ (p=0,241)	
94_EDA_E_aprox	$\chi^2(2)=0{,}877$ (p=0,645)	
95_EDA_E_Fuzzy	$\chi^2(2)=8{,}842$ (p=0,012)	
Normal – Frustration z=-0,526; $p_{angepasst}$=0,015; r_F=0,07	Normal – Overload z=-0,105; $p_{angepasst}$=1,000	Overload – Frustration z=-0,421; $p_{angepasst}$=0,074
99_EDA_L_ldf	$\chi^2(2)=3{,}404$ (p=0,182)	
101_EDA_V_var	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	
102_EDA_V_std	$\chi^2(2)=3{,}193$ (p=0,203)	

Die 2 Features mit statistisch signifikanten Sequenzunterschieden sind in der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 12) dargestellt. Bei beiden sind ausschließlich die Unterschiede zwischen den Sequenzen *Normal* und *Frustration* signifikant.

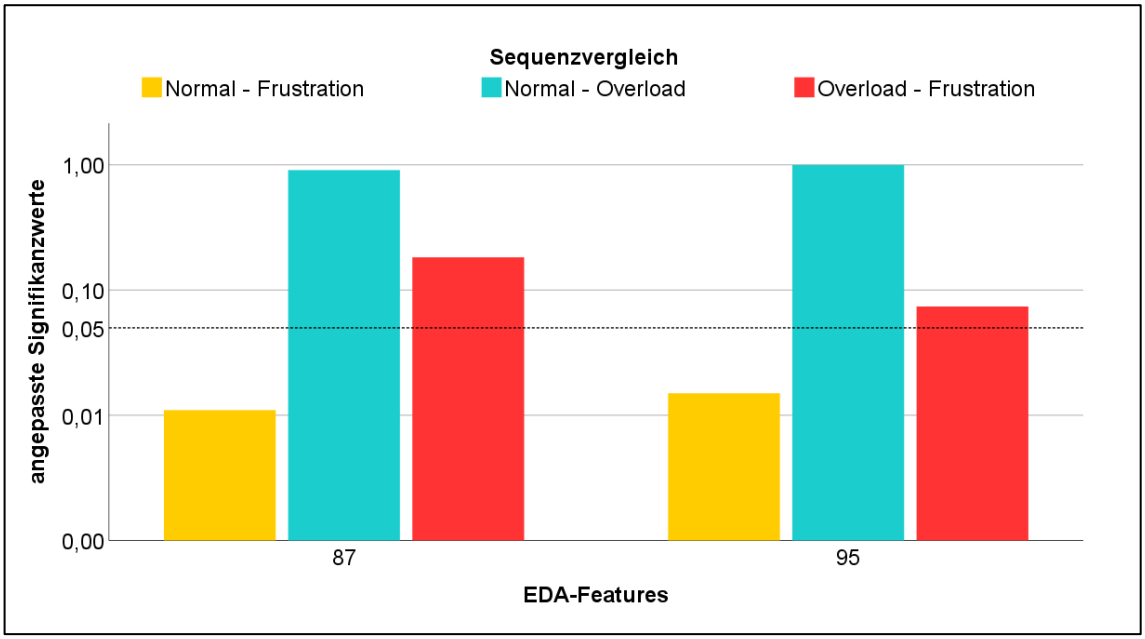

Abbildung 12: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal EDA

Darstellung der EDA-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Den Features sind jeweils 3 Balken zugeordnet, wobei der gelbe für den Sequenzunterschied zwischen *Normal* und *Frustration* steht, der blaue für den Unterschied zwischen *Normal* und *Overload* und der rote für den Unterschied zwischen *Overload* und *Frustration*. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede auf einer logarithmischen Skala durch die angepassten Signifikanzwerte zur Darstellung. Ulm, 2021. EDA: Elektrodermale Aktivität.

Alle der folgenden Features des Biosignals Temperatur zeigen bei der Suche nach Unterschieden zwischen den Sequenzen statistisch signifikante Ergebnisse im Friedman-Test (siehe Tabellen 10 und 11). 6 Sequenzunterschiede weisen einen schwachen Effekt auf und die übrigen Sequenzunterschiede einen sehr schwachen Effekt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Temperatur Teil 1

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal Temperatur mit Auflistung der Temperatur-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Hier wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests wären rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

Feature	**Friedman-Test**	
105_Temp_A_PEAK	$\chi^2(2)=42{,}000$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Overload – Normal $z=0{,}526$; $p_{angepasst}=0{,}015$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-1{,}211$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}16$
106_Temp_A_P2P	$\chi^2(2)=13{,}930$ ($p=0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}614$; $p_{angepasst}=0{,}003$; $r_F=0{,}08$	Normal – Overload $z=-0{,}596$; $p_{angepasst}=0{,}004$; $r_F=0{,}08$	Overload – Frustration $z=-0{,}018$; $p_{angepasst}=1{,}000$
107_Temp_A_RMS	$\chi^2(2)=42{,}000$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Overload – Normal $z=0{,}526$; $p_{angepasst}=0{,}015$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-1{,}211$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}16$
108_Temp_A_MLocMaxV	$\chi^2(2)=42{,}000$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Overload – Normal $z=0{,}526$; $p_{angepasst}=0{,}015$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-1{,}211$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}16$
109_Temp_A_MLocMinV	$\chi^2(2)=42{,}000$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Overload – Normal $z=0{,}526$; $p_{angepasst}=0{,}015$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-1{,}211$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}16$
111_Temp_A_MAV	$\chi^2(2)=42{,}000$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Overload – Normal $z=0{,}526$; $p_{angepasst}=0{,}015$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-1{,}211$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}16$
121_Temp_S_me	$\chi^2(2)=11{,}474$ ($p=0{,}003$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}368$; $p_{angepasst}=0{,}148$	Normal – Overload $z=-0{,}632$; $p_{angepasst}=0{,}002$; $r_F=0{,}08$	Frustration – Overload $z=0{,}263$; $p_{angepasst}=0{,}480$
124_Temp_E_Fuzzy	$\chi^2(2)=8{,}667$ ($p=0{,}013$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}193$; $p_{angepasst}=0{,}909$	Overload – Normal $z=0{,}351$; $p_{angepasst}=0{,}183$	Overload – Frustration $z=-0{,}544$; $p_{angepasst}=0{,}011$; $r_F=0{,}07$

Tabelle 11: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Temperatur Teil 2

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal Temperatur mit Auflistung der Temperatur-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind grün hinterlegt dargestellt. In diesen Fällen sind die Ergebnisse der Post-hoc-Tests jeweils direkt darunter aufgeführt. Signifikante Post-hoc-Tests sind ebenfalls grün hinterlegt. Hier wurde jeweils die Effektstärke zusätzlich berechnet. Nicht signifikante Post-hoc-Tests sind grau hinterlegt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests wären rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. p: Signifikanzwert; $p_{angepasst}$: angepasster Signifikanzwert; r_F: Effektstärke ($=\left|\frac{z}{\sqrt{57}}\right|$); $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat; z: Teststatistik.

130_Temp_V_var	$\chi^2(2)=20{,}035$ ($p<0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}825$; $p_{angepasst}<0{,}001$; $r_F=0{,}11$	Normal – Overload $z=-0{,}544$; $p_{angepasst}=0{,}011$; $r_F=0{,}07$	Overload – Frustration $z=-0{,}281$; $p_{angepasst}=0{,}402$
131_Temp_V_std	$\chi^2(2)=14{,}000$ ($p=0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}474$; $p_{angepasst}=0{,}034$; $r_F=0{,}06$	Normal – Overload $z=-0{,}684$; $p_{angepasst}=0{,}001$; $r_F=0{,}09$	Frustration – Overload $z=0{,}211$; $p_{angepasst}=0{,}783$
132_Temp_V_r	$\chi^2(2)=13{,}930$ ($p=0{,}001$)	
Normal – Frustration $z=-0{,}614$; $p_{angepasst}=0{,}003$; $r_F=0{,}08$	Normal – Overload $z=-0{,}596$; $p_{angepasst}=0{,}004$; $r_F=0{,}08$	Overload – Frustration $z=-0{,}018$; $p_{angepasst}=1{,}000$

Die Temperatur-Features sind in der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 13) dargestellt. Bei fast allen Features sind zwischen den Sequenzen *Normal* und *Overload* und zwischen *Normal* und *Frustration* signifikante Unterschiede zu verzeichnen. Bei etwa der Hälfte der Features sind auch die Unterschiede zwischen den Sequenzen *Overload* und *Frustration* signifikant.

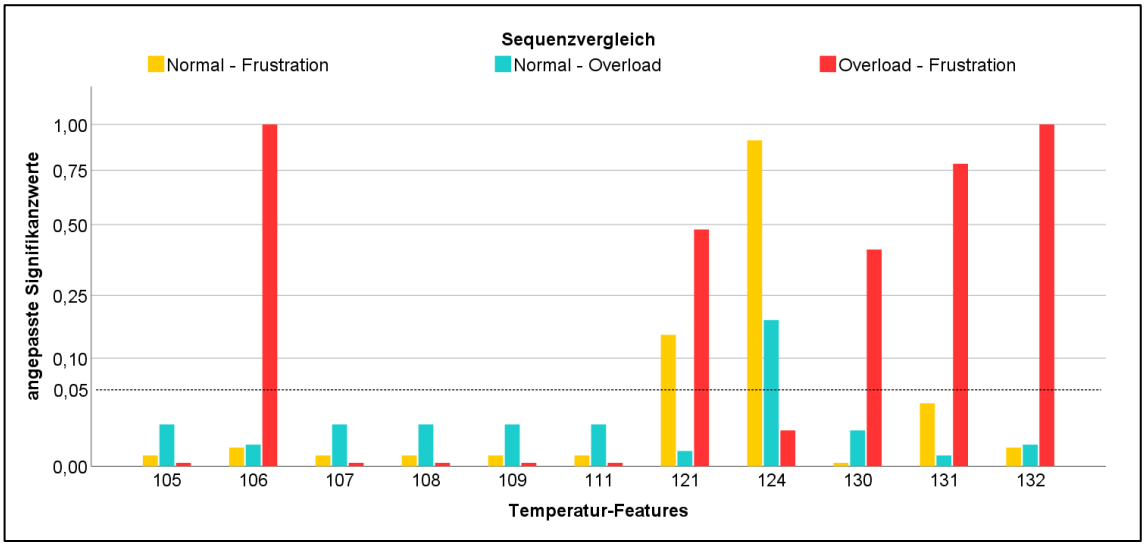

Abbildung 13: Signifikante Ergebnisse des Friedman Tests zu dem Biosignal Temperatur

Darstellung der Temperatur-Features auf der X-Achse. Genannt sind die jeweiligen Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind. Diesen Features sind jeweils 3 Balken zugeordnet, wobei der gelbe für den Sequenzunterschied zwischen *Normal* und *Frustration* steht, der blaue für den Unterschied zwischen *Normal* und *Overload* und der rote für den Unterschied zwischen *Overload* und *Frustration*. Auf der Y-Achse kommen die Unterschiede durch die angepassten Signifikanzwerte zur Darstellung. Ulm, 2021.

Bezogen auf die folgenden EMG-Features können keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Sequenzen *Overload*, *Normal* und *Frustration* gefunden werden (siehe Tabelle 12). Entsprechend entfällt die grafische Darstellung dazu.

Tabelle 12: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EMG

Darstellung der Ergebnisse der Friedmann-Tests für das Biosignal EMG mit Auflistung der EKG-Features. Signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests wären grün hinterlegt dargestellt. Nicht signifikante Ergebnisse der Friedmann-Tests sind rot hinterlegt dargestellt. Ulm, 2021. EMG: Elektromyogramm; p: Signifikanzwert; $\chi^2(2)$: Chi-Quadrat.

Feature	Friedman-Test
134_EMG_A_PEAK	$\chi^2(2)=2{,}351$ ($p=0{,}309$)
135_EMG_A_P2P	$\chi^2(2)=0{,}877$ ($p=0{,}645$)
136_EMG_A_RMS	$\chi^2(2)=2{,}667$ ($p=0{,}264$)
140_EMG_A_MAV	$\chi^2(2)=1{,}298$ ($p=0{,}523$)
145_EMG_F_zc	$\chi^2(2)=1{,}088$ ($p=0{,}581$)
146_EMG_F_fmed	$\chi^2(2)=0{,}667$ ($p=0{,}717$)
148_EMG_F_fmean	$\chi^2(2)=1{,}368$ ($p=0{,}504$)
158_EMG_E_Fuzzy	$\chi^2(2)=1{,}684$ ($p=0{,}431$)
164_EMG_V_var	$\chi^2(2)=1{,}509$ ($p=0{,}470$)
166_EMG_V_r	$\chi^2(2)=0{,}877$ ($p=0{,}645$)

3.3 Korrelationsanalyse

Zur Validierung, dass es sich bei den Daten um abhängige Variablen handelt, wurden Rangkorrelationsanalysen durchgeführt.
Hierbei zeigt sich, dass jeweils die 3 Sequenzen pro Feature untereinander korrelieren, größtenteils mit einem starken Effekt. Die entsprechenden Ergebnisse, aufgeteilt nach den zugehörigen Biosignalen, können den Tabellen A6–A9 im Anhang entnommen werden.

3.4 ANOVA mit Messwiederholung

Auf Grund der Abhängigkeit der Variablen voneinander wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Hierbei soll festgestellt werden, ob es einen Unterschied zwischen den 3 Sequenzen der jeweiligen Features gibt.
Eine ANOVA mit Messwiederholung für die EMG-Features wurde nicht durchgeführt, da diese Features im Friedman-Test keine signifikanten Ergebnisse erzielten. Zum besseren Verständnis werden am Anfang jedes Absatzes die Verläufe der relevanten deskriptiven Daten noch einmal beschrieben.

3.4.1 EKG ANOVA

3.4.1.1 Feature 3_ECG_A_P_mean

Bei Feature *3_ECG_A_P_mean* ist der Mittelwert der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=0,152; SD=0,059) etwas höher als bei der Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=0,152; SD=0,059). Die Sequenz *Frustration* zeigt bei diesem Feature den höchsten Mittelwert ($\bar{x}$=0,157; SD=0,058).
Der Mauchly-Test von Feature *3_ECG_A_P_mean* ist nicht signifikant (Mauchly-W(2)=0,972; p=0,456). Daher wird in diesem Fall von einer Sphärizität ausgegangen. Die verschiedenen Stressarten führen zu keinem statistisch signifikanten Unterschied der Werte (F(2; 112)=1,571; p=0,212).

3.4.1.2 Feature 7_ECG_A_T_mean

Das Feature zeigt einen Anstieg der Mittelwerte von *Normal* ($\bar{x}$=0,176; SD=0,11) zu *Overload* ($\bar{x}$=0,176; SD=0,104) zu *Frustration* ($\bar{x}$=0,189; SD=0,11).
Es wird von einer Verletzung der Sphärizität ausgegangen (Mauchly-W(2)=0,800; p=0,002), weswegen eine Huynh-Feldt-Korrektur der Freiheitsgrade

vorgenommen wurde (ε=0,856). Die unterschiedlichen Sequenzen führen zu statistisch signifikanten Unterschieden bei den Werten von Feature *7_ECG_A_T_mean* (F(1,712; 95,849)=5,684; p=0,007; η_p^2=0,092). Die Effektstärke entspricht mit f=0,32 einem mittleren Effekt. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur ergeben einen statistisch signifikanten Anstieg der Werte von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-0,013; 95 % KI [-0,023; -0,003]; p=0,004). Keine signifikanten Unterschiede gibt es zwischen *Normal* und *Overload* (MDiff=<0,001; 95 % KI [-0,010; 0,009]; p=1,000) und *Overload* und *Frustration* (MDiff=-0,013; 95 % KI [-0,026; <0,001]; p=0,060).

3.4.1.3 Feature 9_ECG_I_PRint_mean

Die Mittelwerte steigen bei diesem Feature von *Normal* ($\bar{x}$=231,307; SD=127,406) zu *Overload* ($\bar{x}$=232,281; SD=125,260) an. Im Gegensatz dazu zeigt die Sequenz *Frustration* die niedrigsten Werte ($\bar{x}$=226,077; SD=126,684).
Bei Feature *9_ECG_I_PRint_mean* liegt keine Sphärizität vor (Mauchly-W(2)=0,887; p=0,037). Daher wurde im Folgenden mit einer Huynh-Feldt-Korrektur gearbeitet (ε=0,926). Die verschiedenen Sequenzen führen zu keinem statistisch signifikanten Unterschied (F(1,853; 103,754)=2,055; p=0,137).

3.4.1.4 Feature 12_ECG_I_QT_mean

Wie auch bei dem vorangegangenen Feature zeigen die Mittelwerte einen Anstieg von *Normal* ($\bar{x}$=385,614; SD=98,326) zu *Overload* ($\bar{x}$=390,446; SD=98,091) und die Sequenz *Frustration* zeigt die niedrigsten Werte ($\bar{x}$=384,874; SD=100,903). Das Feature *12_ECG_I_QT_mean* zeigt im Mauchly-Test statistisch signifikante Ergebnisse (Mauchly-W(2)=0,494; p<0,001), woraufhin die folgende ANOVA nach Greenhouse-Geisser korrigiert wurde (ε=0,664). Die durch die verschiedenen Stressarten hervorgerufenen Unterschiede der Werte sind nicht statistisch signifikant (F(1,328; 74,391)=1,659; p=0,203).

3.4.1.5 Feature 14_ECG_I_ST_mean

Auch hier zeigen die Mittelwerte einen Anstieg von *Normal* ($\bar{x}$=86,958; SD=43,907) zu *Overload* ($\bar{x}$=89,122; SD=45,473) und im Gegensatz dazu einen Abfall bei der Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=86,877; SD=40,944).
Bei Feature *14_ECG_I_ST_mean* liegt keine Sphärizität vor (Mauchly-W(2)=0,821; p=0,004), weswegen eine Huynh-Feldt-Korrektur angewandt wurde

(ε=0,872). Es können keine statistisch signifikanten Ergebnisse erzielt werden (F(1,744; 97,670)=1,871; p=0,165).

3.4.1.6 Feature 30_ECG_hrv_rp_VLF

Die Mittelwerte der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=4,801; SD=3,076) sind am niedrigsten, gefolgt von den Werten der Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=5,115; SD=3,566). Die Werte der Sequenz *Overload* sind am höchsten ($\bar{x}$=5,852; SD=3,474). Der Mauchly-Test ist nicht signifikant (Mauchly-W(2)=0,979; p=0,565). Daher wird in diesem Fall von einer gegebenen Sphärizität ausgegangen. Die verschiedenen Stressarten führen zu keinem statistisch signifikanten Unterschied (F(2; 112)=1,790; p=0,172).

3.4.2 Atmung ANOVA

3.4.2.1 Feature 59_Resp_S_median

Die Sequenz *Overload* zeigt die höchsten Werte ($\bar{x}$=0,444; SD=0,046), gefolgt von *Normal* ($\bar{x}$=0,439; SD=0,045) und *Frustration* ($\bar{x}$=0,430; SD=0,042). Die Annahme der Sphärizität wird erfüllt (Mauchly-W(2)=0,978; p=0,550). Die induzierten Stressarten führen zu statistisch signifikant unterschiedlichen Werten (F(2; 112)=6,803; p=0,002; η_p^2=0,108). Die Effektstärke mit f=0,35 entspricht damit einem mittleren Effekt. Die Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Tests zeigen einen statistisch signifikanten Abfall der Messwerte von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=0,009; 95 % KI [<0,001; 0,017]; p=0,043) und von *Overload* zu *Frustration* (MDiff=0,014; 95 % KI [0,004; 0,023]; p=0,003). Der Anstieg der Werte von *Normal* zu *Overload* ist nicht signifikant (MDiff=-0,005; 95 % KI [-0,014; 0,004]; p=0,622).

3.4.2.2 Feature 61_Resp_S_AI

Die Sequenz *Overload* zeigt die höchsten Werte ($\bar{x}$=60,243; SD=6,199), gefolgt von den Sequenzen *Normal* ($\bar{x}$=59,449; SD=6,019) und *Frustration* ($\bar{x}$=58,355; SD=5,737).

Die Annahme der Sphärizität wird erfüllt (Mauchly-W(2)=0,971; p=0,440). Es zeigen sich signifikante Unterschiede (F(2; 112)=7,168; p=0,001; η_p^2=0,113). Bei einer Effektstärke von f=0,36 entspricht dies einem mittleren Effekt. Ausschließlich der Abfall der Messwerte von *Overload* zu *Frustration* weist einen statistisch signifikanten Unterschied in den anschließenden Post-hoc-Tests auf (MDiff=1,887;

95 % KI [0,573; 3,202]; p=0,002). Der Anstieg von *Normal* zu *Overload* (MDiff=-0,793; 95 % KI [-2,046; 0,460]; p=0,371) und der Abfall von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=1,094; 95 % KI [-0,038; 2,226]; p=0,061) sind nicht signifikant.

3.4.2.3 Feature 62_Resp_S_AIW

Das Feature zeigt die höchsten Mittelwerte in der Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=0,461; SD=0,047), gefolgt von den Sequenzen *Normal* ($\bar{x}$=0,455; SD=0,046) und *Frustration* ($\bar{x}$=0,446; SD=0,044).

Mittels Mauchly-Test kann eine Sphärizität bestätigt werden (Mauchly-W(2)=0,974; p=0,490). Es kann ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen festgestellt werden (F(2; 112)=7,699; p=0,001; η_p^2=0,121). Dies entspricht mit einer Effektstärke von f=0,37 einem mittleren Effekt. Post-hoc-Analysen mit Bonferroni-Korrektur zeigen statistisch signifikante Abfälle zwischen *Normal* und *Frustration* (MDiff=0,009; 95 % KI [<0,001; 0,018]; p=0,041) und *Overload* und *Frustration* (MDiff=0,015; 95 % KI [0,005; 0,025]; p=0,002). Der Anstieg von *Normal* zu *Overload* ist nicht statistisch signifikant (MDiff=-0,006; 95 % KI [-0,015; 0,004]; p=0,397).

3.4.3 EDA ANOVA

3.4.3.1 Feature 87_EDA_F_fmean

Die niedrigsten Mittelwerte weist die Sequenz *Normal* auf ($\bar{x}$=6,6E-06; SD=4,8E-06). Die Sequenz *Frustration* zeigt die höchsten Werte ($\bar{x}$=7,4E-06; SD=7,6E-06), gefolgt von der Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=6,9E-06; SD=5,7E-06). Der Mauchly-Test zeigt ein signifikantes Ergebnis (Mauchly-W(2)=0,419; p<0,001), weswegen eine Greenhouse-Geisser-Korrektur angewandt wurde (ε=0,632). Die unterschiedlichen Versuchsbedingungen führen zu keinem statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Sequenzen (F(1,265; 70,823)=0,626; p=0,467).

3.4.3.2 Feature 95_EDA_E_Fuzzy

Die Sequenz *Frustration* zeigt die höchsten Werte ($\bar{x}$=3,9E-05; SD=1,1E-05) gefolgt von den Sequenzen *Overload* ($\bar{x}$=3,7E-05; SD=0,8E-05) und *Normal* ($\bar{x}$=3,7E-05; SD=1,1E-05). Es kann keine Sphärizität nachgewiesen werden (Mauchly-W(2)=0,785; p=0,001), weswegen mittels einer Huynh-Feldt-Korrektur

gearbeitet wurde (ε=0,844). Signifikante Unterschiede zwischen den Sequenzen können nicht festgestellt werden (F(1,689; 94,582)=2,722; p=0,080).

3.4.4 Temperatur ANOVA

3.4.4.1 Feature 105_Temp_A_PEAK

Die höchsten Mittelwerte zeigt die Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=74,722; SD=25,425), gefolgt von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=69,068; SD=26,745). Die niedrigsten Werte zeigt die Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=65,42; SD=25,912). Es kann keine Sphärizität nachgewiesen werden (Mauchly-W(2)=0,525; p<0,001), weswegen mit einer Greenhouse-Geisser-Korrektur gearbeitet wurde (ε=0,678). Die induzierten Stressarten führen zu statistisch signifikanten Unterschieden zwischen den Sequenzen (F(1,356; 75,919)=23,303; p<0,001; η_p^2=0,294). Dies entspricht mit f=0,65 einem starken Effekt. Sowohl der Anstieg der Werte von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-5,654; 95 % KI [-8,932; -2,377]; p<0,001) und *Overload* zu *Frustration* (MDiff=-9,302; 95 % KI [-13,624; -4,980]; p<0,001), als auch der Abfall von *Normal* zu *Overload* (MDiff=3,648; 95 % KI [1,405; 5,890]; p=0,001) zeigen bei den Post-hoc-Analysen signifikante Unterschiede.

3.4.4.2 Feature 106_Temp_A_P2P

Die Mittelwerte zeigen einen Anstieg von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=0,743; SD=0,102) zu *Overload* ($\bar{x}$=0,777; SD=0,129) zu *Frustration* ($\bar{x}$=0,784; SD=0,119). Der Mauchly-Test fällt signifikant aus (Mauchly-W(2)=0,889; p=0,039). Daher wurde eine Korrektur nach Huynh-Feldt angewandt (ε=0,928). Es können signifikante Unterschiede zwischen den Werten der verschieden Sequenzen festgestellt werden (F(1,856; 103,945)=12,304; p<0,001; η_p^2=0,180). Mit f=0,47 entspricht dies einem starken Effekt. Bei den paarweisen Vergleichen zeigen sich statistisch signifikante Anstiege zwischen *Normal* und *Overload* (MDiff=-0,034; 95 % KI [-0,053; -0,015]; p<0,001) und *Normal* und *Frustration* (MDiff=-0,041; 95 % KI [-0,063; -0,019]; p<0,001). Der Anstieg von *Overload* zu *Frustration* ist nicht signifikant (MDiff=-0,007; 95 % KI [-0,032; 0,018]; p=1,000).

3.4.4.3 Feature 107_Temp_A_RMS

Die höchsten Mittelwerte zeigt die Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=74,365; SD=25,399), gefolgt von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=68,722; SD=26,718). Die niedrigsten Werte

zeigt die Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=65,056; SD=25,881). Eine Korrektur nach Greenhouse-Geisser erfolgte auf Grund von fehlender Sphärizität (Mauchly-W(2)=0,526; p<0,001; ε=0,678). Es können signifikante Unterschiede zwischen den Werten der verschieden Sequenzen festgestellt werden (F(1,357; 75,984)=23,333; p<0,001; η_p^2=0,294). Mit f=0,65 entspricht dies einem starken Effekt. Bei den paarweisen Vergleichen zeigt sich ein statistisch signifikanter Abfall von *Normal* zu *Overload* (MDiff=3,666; 95 % KI [1,420; 5,912]; p=0,001) und signifikante Anstiege von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-5,642; 95 % KI [-8,917; -2,368]; p<0,001) und von *Overload* zu *Frustration* (MDiff=-9,308; 95 % KI [-13,630; -4,987]; p<0,001).

3.4.4.4 Feature 108_Temp_A_MLocMaxV

Die höchsten Mittelwerte zeigt die Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=74,381; SD=25,401), gefolgt von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=68,738; SD=26,719). Die niedrigsten Werte zeigt die Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=65,072; SD=25,881). Es kann keine Sphärizität nachgewiesen werden (Mauchly-W(2)=0,526; p<0,001), weswegen mit einer Greenhouse-Geisser-Korrektur gearbeitet wurde (ε=0,678). Es können statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden (F(1,357; 75,984)=23,336; p<0,001; η_p^2=0,294). Dies entspricht mit f=0,65 einem starken Effekt. Die Post-hoc-Analysen stellen zwischen allen Sequenzen signifikante Unterschiede fest, sowohl bei dem Abfall der Werte von *Normal* zu *Overload* (MDiff=3,666; 95 % KI [1,420; 5,912]; p=0,001), als auch bei den Anstiegen von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-5,643; 95 % KI [-8,918; -2,369]; p<0,001) und von *Overload* zu *Frustration* (MDiff=-9,309; 95 % KI [-13,630; -4,988]; p<0,001).

3.4.4.5 Feature 109_Temp_A_MLocMinV

Die höchsten Mittelwerte zeigt die Sequenz *Frustration* ($\bar{x}$=74,34; SD=25,398), gefolgt von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=68,697; SD=26,717). Die niedrigsten Werte zeigt die Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=65,031; SD=25,879). Es kann keine Sphärizität nachgewiesen werden (Mauchly-W(2)=0,526; p<0,001), weswegen mit einer Greenhouse-Geisser-Korrektur gearbeitet wurde (ε=0,678). Es können statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden (F(1,357; 75,984)=23,336; p<0,001; η_p^2=0,294). Dies entspricht mit f=0,65 einem starken Effekt. Bei dem Abfall der Werte von *Normal* zu *Overload* (MDiff=3,666; 95 % KI [1,420; 5,912]; p=0,001)

und bei den Anstiegen von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-5,643; 95 % KI [-8,918; -2,369]; p<0,001) und von *Overload* zu *Frustration* (MDiff=-9,309; 95 % KI [-13,630; -4,988]; p<0,001) zeigen die Post-hoc-Analysen signifikante Unterschiede.

3.4.4.6 Feature 111_Temp_A_MAV

Die Sequenz Frustration zeigt die höchsten Mittelwerte ($\bar{x}$=74,364; SD=25,399), gefolgt von den Sequenzen Normal ($\bar{x}$=68,722; SD=26,718) und Overload ($\bar{x}$=65,056; SD=25,881). Es kann keine Sphärizität nachgewiesen werden (Mauchly-W(2)=0,526; p<0,001), weswegen mit einer Greenhouse-Geisser-Korrektur gearbeitet wurde (ε=0,678). Es können statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden (F(1,357; 75,984)=23,333; p<0,001; η_p^2=0,294). Dies entspricht mit f=0,65 einem starken Effekt. Die Post-hoc-Analysen stellen zwischen allen Sequenzen signifikante Unterschiede fest, sowohl bei dem Abfall der Werte von *Normal* zu *Overload* (MDiff=3,666; 95 % KI [1,420; 5,912]; p=0,001), als auch bei den Anstiegen von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-5,642; 95 % KI [-8,917; -2,368]; p<0,001) und von *Overload* zu *Frustration* (MDiff=-9,308; 95 % KI [-13,630; -4,987]; p<0,001).

3.4.4.7 Feature 121_Temp_S_me

Die Sequenz *Overload* zeigt die höchsten Mittelwerte ($\bar{x}$=0,094; SD=0,039), gefolgt von den Sequenzen *Frustration* ($\bar{x}$=0,089; SD=0,031) und *Normal* ($\bar{x}$=0,081; SD=0,026). Der Mauchly-Test fällt signifikant aus (Mauchly-W(2)=0,868; p=0,021). Daher wurde eine Korrektur nach Huynh-Feldt angewandt (ε=0,910). Es können signifikante Unterschiede zwischen den Werten der verschieden Sequenzen festgestellt werden (F(1,821; 101,963)=8,660; p=0,001; η_p^2=0,134). Mit f=0,39 entspricht dies einem mittleren Effekt. Bei den paarweisen Vergleichen zeigen sich die Anstiege zwischen *Normal* und *Overload* (MDiff=-0,013; 95 % KI [-0,020; -0,006]; p<0,001) und *Normal* und *Frustration* (MDiff=-0,008; 95 % KI [-0,015; -0,001]; p=0,020) statistisch signifikant. Der Abfall von *Overload* zu *Frustration* ist nicht signifikant (MDiff=0,005; 95 % KI [-0,004; 0,014]; p=0,525).

3.4.4.8 Feature 124_Temp_E_Fuzzy

Die Sequenz *Frustration* zeigt die höchsten Mittelwerte ($\bar{x}$=6,8E-05; SD=0,7E-05), gefolgt von den Sequenzen *Normal* ($\bar{x}$=6,7E-05; SD=0,7E-05) und *Overload*

($\bar{x}$=6,6E-05; SD=1,0E-05). Die Annahme der Sphärizität wird erfüllt (Mauchly-W(2)=0,973; p=0,475). Die induzierten Stressarten führen zu keinen statistisch signifikant unterschiedlichen Werten (F(2; 112)=2,503; p=0,086).

3.4.4.9 Feature 130_Temp_V_var

Die Sequenz *Frustration* zeigt die höchsten Mittelwerte ($\bar{x}$=0,039; SD=0,015), gefolgt von den Sequenzen *Overload* ($\bar{x}$=0,036; SD=0,016) und *Normal* ($\bar{x}$=0,033; SD=0,013). Bei diesem Feature zeigt sich eine Verletzung der Sphärizität (Mauchly-W(2)=0,820; p=0,004), weswegen eine Huynh-Feldt-Korrektur der Freiheitsgrade vorgenommen wurde (ε=0,871). Die unterschiedlichen Sequenzen führen zu statistisch signifikanten Unterschieden bei den Werten (F(1,742; 97,531)=16,963; p<0,001; η_p^2=0,232). Die Effektstärke entspricht mit f=0,55 einem starken Effekt. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur ergeben einen statistisch signifikanten Anstieg der Werte von *Normal* zu *Overload* (MDiff=-0,003; 95 % KI [-0,005; -0,001]; p=0,006) und von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-0,006; 95 % KI [-0,008; -0,004]; p<0,001). Der Anstieg zwischen *Overload* und *Frustration* ist nicht signifikant (MDiff=-0,003; 95 % KI [-0,006; 3,936E-5]; p=0,054).

3.4.4.10 Feature 131_Temp_V_std

Die höchsten Mittelwerte zeigt die Sequenz *Overload* ($\bar{x}$=0,149; SD=0,029), gefolgt von den Sequenzen *Frustration* ($\bar{x}$=0,148; SD=0,025) und *Normal* ($\bar{x}$=0,140; SD=0,021). Der Mauchly-Test fällt signifikant aus (Mauchly-W(2)=0,863; p=0,017). Daher wurde eine Korrektur nach Huynh-Feldt angewandt (ε=0,906). Es können signifikante Unterschiede zwischen den Werten der verschieden Sequenzen festgestellt werden (F(1,812; 101,459)=10,192; p<0,001; η_p^2=0,154). Mit f=0,43 entspricht dies einem starken Effekt. Bei den paarweisen Vergleichen zeigen sich statistisch signifikante Anstiege zwischen den Sequenzen *Normal* und *Overload* (MDiff=-0,010; 95 % KI [-0,015; -0,005]; p<0,001) und *Normal* und *Frustration* (MDiff=-0,008; 95 % KI [-0,013; -0,002]; p=0,002). Der Abfall von *Overload* zu *Frustration* ist nicht signifikant (MDiff=0,002; 95 % KI [-0,004; 0,009]; p=1,000).

3.4.4.11 Feature 132_Temp_V_r

Die Mittelwerte steigen von der Sequenz *Normal* ($\bar{x}$=0,743; SD=0,102) zu *Overload* ($\bar{x}$=0,777; SD=0,129) zu *Frustration* ($\bar{x}$=0,784; SD=0,119). Bei diesem

Feature zeigt sich eine Verletzung der Sphärizität (Mauchly-W(2)=0,889; p=0,039), weswegen eine Huynh-Feldt-Korrektur der Freiheitsgrade vorgenommen wurde (ε=0,928). Die unterschiedlichen Sequenzen führen zu statistisch signifikanten Unterschieden bei den Werten (F(1,856; 103,945)=12,304; p<0,001; η_p^2=0,180). Die Effektstärke entspricht mit f=0,47 einem starken Effekt. Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur ergeben statistisch signifikante Anstiege der Werte von *Normal* zu *Overload* (MDiff=-0,034; 95 % KI [-0,053; -0,015]; p<0,001) und von *Normal* zu *Frustration* (MDiff=-0,041; 95 % KI [-0,063; -0,019]; p<0,001). Der Anstieg zwischen *Overload* und *Frustration* ist nicht signifikant (MDiff=-0,007; 95 % KI [-0,032; 0,018]; p=1,000).

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mittels der ANOVA mit Messwiederholung werden bei insgesamt 14 Features statistisch signifikante Unterschiede zwischen den 3 Sequenzen gezeigt. Hierbei handelt es sich um 1 EKG-Feature, 3 Atmungs-Features und 10 Temperatur-Features. Diese Features sind in der folgenden Abbildung zusammen mit ihren zugehörigen Effektstärken dargestellt (siehe Abbildung 14).

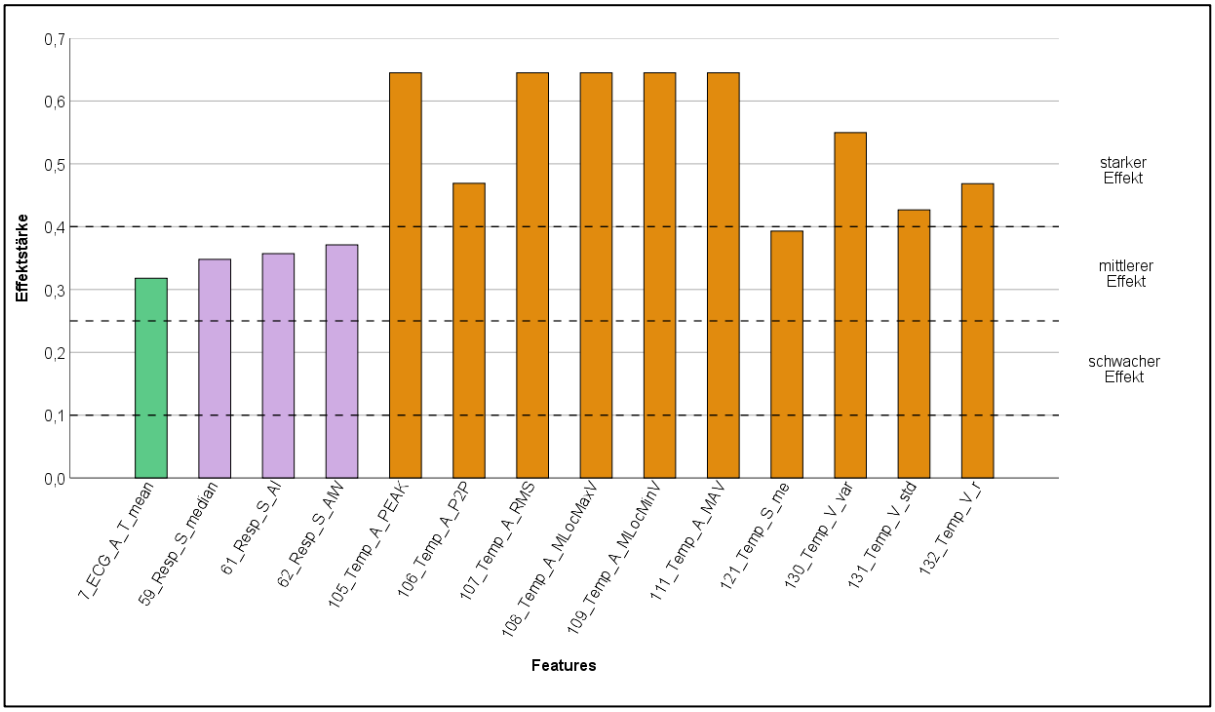

Abbildung 14: ANOVA-Effektstärken signifikanter Features

Darstellung der Features, die in der ANOVA mit Messwiederholung signifikante Ergebnisse zeigen, auf der X-Achse. Der jeweilige Balken stellt die Höhe der Effektstärke auf der Y-Achse dar. Zur besseren Unterscheidung sind die Features entsprechend ihres Biosignals farbig markiert. So ist das EKG-Feature grün, die 3 Atmungs-Features sind violett und die 10 Temperatur-Features sind orange markiert. Ulm, 2021. ANOVA: Varianzanalyse; EKG: Elektrokardiogramm.

Die im Anschluss an die ANOVAs mit Messwiederholung durchgeführten Post-hoc-Tests geben Aufschluss darüber, zwischen welchen Sequenzen signifikante Unterschiede bestehen. Diese Ergebnisse sind im Folgenden zusammenfassend tabellarisch dargestellt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: signifikante Sequenzunterschiede

Vereinfachte Darstellung der Ergebnisse der Post-hoc-Tests nach den ANOVAs mit Messwiederholung. In der ersten Spalte sind die signifikanten Features mit vollständigem Feature-Namen aufgeführt. Die einzelnen Features sind zur besseren Unterscheidung der Biosignalgruppe farblich markiert. Das EKG-Feature ist grün markiert, die Atmungs-Features sind violett und die Temperatur-Features sind orange markiert. In den folgenden Spalten sind die jeweils verglichenen Sequenzunterschiede aufgetragen. Die Spalten sind im Falle signifikanter Ergebnisse grün hinterlegt. Hellgrau hinterlegte Felder mit einem „x" kennzeichnen nicht signifikante Sequenzunterschiede. Ein „↑" kennzeichnet einen signifikanten Anstieg der gemessenen Werte von der erstgenannten Sequenz zur zweiten Sequenz. Analog markiert ein „↓" einen signifikanten Abfall der Werte von der erstgenannten Sequenz zu der Zweiten. Ulm, 2021. ANOVA: Varianzanalyse; EKG: Elektrokardiogramm.

	Normal – Overload	Normal – Frustration	Overload - Frustration
7_ECG_A_T_mean	x	↑	x
59_Resp_S_median	x	↓	↓
61_Resp_S_AI	x	x	↓
62_Resp_S_AIW	x	↓	↓
105_Temp_A_PEAK	↓	↑	↑
106_Temp_A_P2P	↑	↑	x
107_Temp_A_RMS	↓	↑	↑
108_Temp_A_MLocMaxV	↓	↑	↑
109_Temp_A_MLocMinV	↓	↑	↑
111_Temp_A_MAV	↓	↑	↑
121_Temp_S_me	↑	↑	x
130_Temp_V_var	↑	↑	x
131_Temp_V_std	↑	↑	x
132_Temp_V_r	↑	↑	x

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass sich vor allem Features der Biosignale EKG, Atmung und Temperatur für die Beantwortung der in Kapitel 1.5 genannten Hypothesen eignen.

Es zeigt sich, dass für alle gestellten Einzelfragen, jeweils spezielle Features wie folgt herangezogen werden können. Zur Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen eignen sich vor allem Temperatur-Features. Für die Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen können Features aller 3 genannten Biosignale herangezogen werden. Zuletzt kann auch die Unterscheidung zwischen emotionalem Stress und mentalem Stress besonders gut anhand von Features der Biosignale Atmung und Temperatur realisiert werden.

4 Diskussion

Es existieren zahlreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen von Stress auf den menschlichen Körper. Einige Arbeiten beschäftigen sich mit den rein hormonellen Reaktionen, andere mit den mechanisch-physiologischen Reaktionen. Die meisten von diesen Arbeiten untersuchen aber ausschließlich die Reaktionen unter mentalem Stress oder die Auswirkungen von Emotionen. Auf einer Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress liegt bisher noch kein Augenmerk.
Das Ziel dieser Arbeit war es deshalb, Merkmale in Biosignaldaten zu identifizieren, mit denen eine Unterscheidung zwischen emotionalem und mentalem Stress gelingt. Mithilfe statistischer Methoden wurden aus einer Vielzahl an Features jene extrahiert, die zur Unterscheidung genutzt werden können. Emotionaler Stress wurde in dem Experiment zu dieser Arbeit durch die Emotion Frustration erzeugt. Neben der Fragestellung bezüglich der Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress galt es auch, diese Stresszustände jeweils von Nicht-Stress-Zuständen abzugrenzen.

Bezogen auf die Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen waren in den ANOVAs mit Messwiederholung ausschließlich 10 Temperatur-Features signifikant. Diese zeigten sich auch in den vorangegangenen Friedmann-Tests zusammen mit 3 EKG-Features signifikant. Bei den Temperatur-Features handelt es sich um solche aus den Kategorien Amplitude, Stationarität und Variabilität. Tendenziell scheinen die Werte der Kategorien Stationarität und Variabilität unter mentalem Stress im Vergleich zu Nicht-Stresszuständen erhöht. Dagegen sind die Amplituden-Werte (bis auf eine Ausnahme) unter mentalem Stress niedriger als unter Nicht-Stresszuständen. Diese Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus der Arbeit von Vinkers et al. und anderen Arbeiten, in denen ebenfalls die periphere Körpertemperatur unter mentalen Stresskonditionen gemessen wurde und ein deutlicher Abfall der Temperatur an den Fingern verzeichnet wurde [29, 122]. Auch Giannakakis et al. kamen in ihrer Metaanalyse bezüglich der Fingertemperatur zu ähnlichen Ergebnissen [32].
Im Gegensatz zu vielen anderen Analysen, konnte in der vorliegenden Arbeit kein

statistisch signifikanter Anstieg der Herzfrequenz unter Stress verzeichnet werden [5, 8, 48, 96]. Ausschließlich 3 EKG-Features konnten mit einem signifikanten Friedman-Test extrahiert werden. Dabei handelt es sich unter anderem um 2 Intervalle: das Q-T-Intervall und das S-T-Intervall. In dieser Arbeit zeigen die beiden Intervall-Features unter mentalem Stress tendenziell höhere Werte als unter den Kontrollbedingungen. Auch van Lien et. al bemerkten unter Stresskonditionen Veränderungen in der QT- und ST-Strecke, jedoch zeigten diese Veränderungen, gegensätzlich zu der hier vorliegenden Arbeit, verringerte Intervall-Werte [120].
Zur Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen ist in dieser Arbeit abweichend zur Literatur [32] nur ein HRV-Feature aus der Frequency Domain, nämlich die relative Leistung des VLF Bandes, signifikant. Die Tendenz der Erhöhung der relativen Leistung des VLF-Bandes unter mentalem Stress zeigte sich bereits in der Metaanalyse von Giannakakis et al. [32]. Weder in den ANOVAs mit Messwiederholung noch in den Friedman-Tests fanden sich signifikante Unterschiede der Features aus den Biosignalen Atmung, EDA und EMG. Das steht im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten, in denen sich gerade die EDA, aber auch die EMG und die Atmung, als gute Biosignale zur Stressdetektion präsentiert hatten [1, 13, 32, 35, 61, 62, 67, 83, 100, 128, 129].

Zur Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stresszuständen waren in den ANOVAs mit Messwiederholung 1 EKG-Feature, 2 Atmungs-Features und 10 Temperatur-Features signifikant. Bei dem EKG-Feature handelt es sich um die Amplitude der T-Welle, welche unter emotionalem Stress höher ist als unter Nicht-Stress-Zuständen. Veränderungen der T-Wellen-Amplitude wurden bereits unter mentalem Stress beobachtet, jedoch eher in Form von Verringerungen der Amplitude [18, 120]. Dahingehend berichteten auch Weiss et al. in ihrem Review von Verringerungen der T-Wellen Amplitude unter emotionalem Stress [127].
Bei den Atmungs-Features handelt es sich um Features aus der Kategorie Stationarität. Beide weisen unter emotionalem Stress eher eine geringere Stationarität auf als unter Kontrollbedingungen. Trotz fehlender signifikanter Veränderungen der Atemfrequenz in dieser Arbeit ist zu erwähnen, dass unter anderem Giannakakis et al. in ihrer Arbeit Irregularitäten der Atmung aufgefallen sind, was das Ergebnis einer verringerten Stationarität bestätigt [32, 101, 104].

Die gleichen Temperatur-Features, die bei der Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen signifikant sind, sind auch für die Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen signifikant. Diese Features aus den Kategorien Amplitude, Stationarität und Variabilität zeigen unter emotionalem Stress tendenziell höhere Werte als unter Kontrollbedingungen und damit auch höhere Werte als unter mentalem Stress. Bezogen auf die erhöhten Werte der Amplituden- und Variabilitäts-Features zeigten sich Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen der bisherigen Forschung [27, 63, 85].
In den vorausgegangenen Friedmann-Tests zeigten sich zu den Temperatur-Features nur 2 EDA-Features signifikant. Von diesen gehörte eines der Kategorie Frequenz und das andere der Kategorie Entropie an. Beide zeigen unter emotionalem Stress erhöhte Werte im Vergleich zu dem Nicht-Stress-Zustand. Dies stimmt mit den Ergebnissen des bisherigen Forschungsstandes überein [9, 99]. Die klassischen Features, wie die Amplitudenhöhe, fallen in der vorliegenden Arbeit nicht signifikant aus.
Weder in den ANOVAs mit Messwiederholung, noch in den vorangegangenen Friedmann-Tests finden sich signifikante EMG-Features zur Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen. Das steht im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten, welche anhand von EMG-Features zwischen diesen beiden Zuständen unterscheiden konnten [126, 131].

Aus den Daten von 5 Biosignalen konnten in den ANOVAs mit Messwiederholung letztendlich 3 Features aus dem Biosignal Atmung und 5 Features aus dem Biosignal Temperatur als relevant für die Fragestellung bezüglich der Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress eingestuft werden. In den vorausgegangenen Friedmann-Tests zeigten 5 EKG-Features signifikante Ergebnisse. Weder EDA-Features noch Features des Biosignals EMG waren in den Tests signifikant für die Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress. Auch wenn in den wenigsten Studien genau diese Fragestellung nach der Unterscheidung der beiden Stressformen verfolgt wurde, steht das Ergebnis der fehlenden Signifikanz bezüglich der EDA- und EMG-Features doch im Gegensatz zu ähnlichen Arbeiten [32, 46, 53, 56, 63, 72, 128].
Bei den 5 EKG-Features, die für die Unterscheidung von emotionalem und mentalem Stress in den Friedmann-Tests signifikant sind, handelt es sich um 2

Features aus der Kategorie Amplitude, ebenfalls 2 Features aus der Kategorie Intervall und ein HRV-Feature. Sowohl die T- als auch die P-Welle sind unter emotionalem Stress höher als unter mentalem Stress. Die QT-Strecke und das PR-Intervall sind unter emotionalem Stress tendenziell kürzer als unter mentalem Stress. Ebenso ist auch die relative Leistung des VLF-Bandes unter emotionalem Stress niedriger als unter mentalem Stress.
Bei den 3 Features aus dem Biosignal Atmung handelt es sich ausschließlich um Features aus der Kategorie Stationarität. Die Werte sind unter emotionalem Stress niedriger als unter mentalem Stress.
Die 5 Features des Biosignals Temperatur stammen aus der Kategorie Amplitude. Hierbei zeigen sich unter emotionalem Stress jeweils höhere Feature-Werte als unter mentalem Stress. Auch Rimm-Kaufman et al. konnten in ihrer Arbeit zwischen emotionalen Zuständen und kognitiven Belastungen anhand der Fingertemperatur unterscheiden [85]. Jedoch zeigten sich in ihrer Arbeit eher niedrige Temperaturen unter negativ-emotionalen Bedingungen und keine Veränderungen unter mentaler Beanspruchung.
Insgesamt sind die Interpretation dieser Arbeit und der Vergleich mit dem aktuellen Forschungsstand bezüglich der Differenzierung zwischen mentalem und emotionalem Stress auf Grund mangelnder Literatur limitiert.

Auffällig in dieser Arbeit ist die Dominanz signifikanter Atmungs- und Temperatur-Features, welche sich so in anderen Arbeiten zu diesem Thema bislang nicht zeigte. Da besonders viele der Temperatur-Features signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Sequenzen aufzeigen, wurden im Nachgang der eigentlichen Arbeit die zuvor ausgeschlossenen Temperatur-Features noch untersucht. Damit sollte geprüft werden, ob möglicherweise besonders relevante Features ausgeschlossen worden waren. Die 18 Temperatur-Features aus den Kategorien Amplitude, Frequenz, Stationarität, Entropie, Linearität und Variabilität wurden entsprechend der Vorgehensweise dieser Arbeit statistisch untersucht. Im Friedman-Test zeigten 11 von den 18 Features signifikante Sequenzunterschiede (Feature-Nummern: 112, 113, 114, 115, 116, 117, 122, 125, 127, 129, 133). Von diesen zeigten aber nur die Features 112, 114 und 122 für diese Arbeit relevante Unterschiede zwischen den Sequenzen *Overload* und *Frustration*. In der anschließend bei den restlichen 11 Features durchgeführten ANOVA mit

Messwiederholung zeigten 8 Features (112, 113, 114, 115, 122, 125, 129, 133) signifikante Ergebnisse, wobei nur 2 Features signifikante Unterschiede zwischen den Sequenzen *Overload* und *Frustration* zeigten. Hierbei handelte es sich um die Features 112_Temp_A_MAVFD und 114_Temp_A_MAVSD, welche beide auch im Friedman-Test signifikante Unterschiede zwischen den 2 Sequenzen anzeigten. Daraus resultiert, dass die getroffene Vorauswahl die meisten für die Fragestellung relevanten Temperatur-Features mit einbegriffen hat.

Mögliche Limitationen dieser Arbeit beinhaltet unter anderem die starke Artefakt-Anfälligkeit des Biosignals Temperatur, da gerade die peripher gemessene Temperatur stark von der Umgebungstemperatur und anderen Faktoren beeinflusst wird und somit zur Verfälschung der Ergebnisse führen kann. Stark in Zusammenhang damit steht auch die EDA, welche ebenfalls von dem Bewegungsausmaß der Studienteilnehmenden und den Umgebungseinflüssen abhängig ist. Zusätzlich standen die Testpersonen während des Experiments. Dies kann einen Einfluss auf den Grundtonus der Muskulatur und damit mögliche verfälschende Effekte, vor allem über die Gesamtdauer des Experiments, auf die EMG-Ergebnisse haben.
Außerdem sollte ein möglicher Reihenfolgeeffekt im Studiendesign berücksichtigt werden. Die Sequenzen wurden immer in der gleichen Reihenfolge durchlaufen, sodass eine Beeinflussung durch die jeweils vorherigen Sequenz(en) nicht ausgeschlossen werden kann.
Eine weitere Limitation besteht in der Vielzahl von Biosignalen und zugehörigen Features, deren Definition und Vergleich sich in der Literatur mitunter schwierig gestalten. Hier können weitere Normierungen der Messgrößen sowie im speziellen eine Vereinheitlichung der Messgerätschaften besser vergleichbare und damit validere Daten liefern.
In einer Folgeanalyse könnte die in der Studie erhobene Sequenz *Easy* ebenfalls als Baseline-Sequenz herangezogen werden. Da die Testpersonen hierbei ein noch geringeres Stressniveau empfanden [41], würden sich bei einer erneuten Analyse möglicherweise stärkere Sequenzunterschiede darstellen. Ebenso könnte in einer Folgeuntersuchung das Geschlecht als mögliche Moderatorvariable berücksichtigt werden.

Letztendlich kann anhand dieser Arbeit gezeigt werden, dass eine Unterscheidung zwischen emotionalem und mentalem Stress anhand von Biosignalen möglich ist. In Zukunft können die als relevant eingestuften Merkmale diagnostisch zur Stressdetektion und spezifischen Diskrimination von unterschiedlichen Stressarten genutzt werden. Im Rahmen von Biofeedback-Behandlungen könnten solche diagnostischen Methoden zugleich therapeutisch eingesetzt werden. Aber auch präventive Felder könnten eröffnet werden. Hierbei wären für die Allgemeinheit frei zugängliche Anwendungen, wie z. B. in Smartwatches oder Fahrerassistenzsysteme integrierte Applikationen denkbar. Stressdetektionsmechanismen, auf Basis von Stress-Features entwickelt, können somit zur Reduktion von mentalem Stress und/oder zur Bewältigung von emotionalem Stress genutzt werden.

5 Zusammenfassung

Diese Arbeit im Bereich der Psychosomatik befasst sich mit den stressassoziierten physiologischen Reaktionen des Körpers. Im Speziellen werden die Daten von Biosignalen genutzt. Ziel der Arbeit war es, besonders stresssensitive Features aus Biosignalen herauszuarbeiten. Grundsätzlich sollen diese zur Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen, aber auch zur Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen nutzbar sein. Zusätzlich dazu widmet die Arbeit sich der Fragestellung nach der Differenzierung von emotionalem und mentalem Stress anhand von Biosignalen. Vor allem bezogen auf die ersten beiden Fragestellungen der Arbeit existieren einige Vergleichsarbeiten. In vielen Arbeiten werden arithmetische Aufgaben zur Induktion von mentalem Stress genutzt und oftmals z. B. Veränderungen der elektrodermalen Aktivität, der Muskelspannung, der Körpertemperatur oder im Elektrokardiogramm (EKG) beobachtet. Weniger Arbeiten beschäftigen sich mit den Veränderungen durch emotionalen Stress, doch auch hier werden z. B. Veränderungen der Atmung, des EKGs oder der elektrodermalen Aktivität genannt. Doch die Unterscheidung von emotionalem Stress und mentalem Stress findet bisher keine Beachtung. Daher stellt sich die Frage, ob eine solche Unterscheidung überhaupt möglich ist und wenn ja, anhand welcher Features.

Die Relevanz einer solchen Arbeit lässt sich aus den potentiellen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit von sowohl chronischem, als auch akutem Stress ableiten. Damit zusammenhängend können potentielle Erkenntnisse zukünftig präventiv, beispielsweise über Biofeedbacks oder in der Diagnostik, genutzt werden.

Die Arbeit basiert auf Grundlage des „uulm MAC Database“. Hierbei wurden in einer Mensch-Maschinen-Interaktion in 6 Sequenzen (Easy, Intro, Normal, Overload, Underload und Wrong Answer) bei 60 Testpersonen verschiedene emotionale und mentale Zustände provoziert. Parallel dazu wurden die Biosignale von EKG, Atmung, elektrodermaler Aktivität, Temperatur und Muskelaktivität abgeleitet. Die unterschiedlichen emotionalen und mentalen Zustände wurden mittels subjektivem Feedback validiert. Anhand dieser konnten die Sequenzen „Overload“ und „Frustration“ einem hohen Stressempfinden und die Sequenz

„Normal“ einer Baseline zugeordnet werden. Die Rohdaten wurden geschnitten, vorverarbeitet gefiltert und konvertiert. Im Anschluss konnten verschiedene Merkmale extrahiert und in die 6 Kategorien Amplitude, Frequenz, Stationarität, Entropie, Linearität und Variabilität eingeordnet werden. Zusätzlich dazu wurden aus den EKG-Rohdaten mit der MATLAB Toolbox „ecgFEAT“ und der Software KUBIOS spezielle, stressrelevante EKG-Features extrahiert. Im Anschluss erfolgte die statistische Auswertung aller relevanten Features mittels SPSS über Varianzanalysen.

In den ANOVAs (analysis of variance) mit Messwiederholung zeigten sich final insgesamt 14 Features, welche statistisch signifikante Unterschiede zwischen den 3 Sequenzen „Frustration“, „Overload“ und „Normal“ aufwiesen. Hierbei handelte es sich um 1 EKG-Feature, 3 Atmungs-Features und 10 Temperatur-Features. Zur Unterscheidung von mentalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen eignen sich vor allem Temperatur-Features. Für die Unterscheidung von emotionalem Stress und Nicht-Stress-Zuständen können Features aller 3 genannten Biosignale herangezogen werden. Zuletzt ist auch die Unterscheidung von emotionalem Stress und mentalem Stress besonders anhand von Features der Biosignale Atmung und Temperatur möglich.

Diese Ergebnisse sind nur teilweise mit denen anderer Arbeiten vergleichbar. Es finden sich trotzdem Parallelen, wie beispielsweise Veränderungen der Atmungsparameter oder EKG- und Temperaturveränderungen. Die aktuelle Literatur in diesem Forschungsbereich präsentiert abweichend deutlich mehr signifikante EKG- Veränderungen und Veränderungen der Muskelaktivität, als in der vorliegenden Arbeit festgestellt wurden.

Mögliche Limitationen dieser Arbeit liegen in der Artefakt-Anfälligkeit der Biosignale und im Studiendesign. So könnte in Folgearbeiten auch die Sequenz „Easy“ als Baseline genutzt werden.

Abschließend kann anhand der Arbeit gezeigt werden, dass auch eine Unterscheidung zwischen emotionalem und mentalem Stress anhand von Biosignalen möglich ist. Zukünftig können diese, als relevant eingestuften Merkmale, diagnostisch zur Stressdetektion eingesetzt und potentiell in der Stressprävention genutzt werden.

6 Literaturverzeichnis

1. Acerbi G, Rovini E, Betti S, Tirri A, Rónai J F, Sirianni A, Agrimi J, Eusebi L, Cavallo F: A wearable system for stress detection through physiological data analysis. Ambient Assisted Living Italian Forum 2016, Springer International Publishing: 31–50 (2017)
2. Alonso J F, Romero S, Ballester M R, Antonijoan R M, Mañanas M A: Stress assessment based on EEG univariate features and functional connectivity measures. Physiological measurement 36: 1351–1365 (2015)
3. Amboss: Kardiomyopathien https://www.amboss.com/de/wissen/Kardiomyopathien (08.01.2022)
4. Amboss: Stressmodelle https://www.amboss.com/de/wissen/Stressmodelle#Z0da157710621c03cf8204068e5bc2e2d (22.10.2021)
5. Andrássy G, Szabo A, Ferencz G, Trummer Z, Simon E, Tahy A: Mental Stress May Induce QT-Interval Prolongation and T-wave Notching. Annals of noninvasive electrocardiology 12: 251–259 (2007)
6. Baker D G, Ekhator N N, Kasckow J W, Dashevsky B, Horn P S, Bednarik L, Geracioti T D: Higher levels of basal serial CSF cortisol in combat veterans with posttraumatic stress disorder. The American journal of psychiatry 162: 992–994 (2005)
7. Blechert J, Lajtman M, Michael T, Margraf J, Wilhelm F H: Identifying anxiety states using broad sampling and advanced processing of peripheral physiological information. Biomedical sciences instrumentation 42: 136–141 (2006)
8. Boutcher S H, Stocker D: Cardiovascular Response of Young and Older Males to Mental Challenge. The journals of gerontology. Series B, Psychological sciences and social sciences 51: 261-267 (1996)
9. Bradley M M, Miccoli L, Escrig M A, Lang P J: The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. Psychophysiology 45: 602–607 (2008)
10. Brotman D J, Girod J P, Posch A, Jani J T, Patel J V, Gupta M, Lip G Y H, Reddy S, Kickler T S: Effects of short-term glucocorticoids on hemostatic factors in healthy volunteers. Thrombosis research 118: 247–252 (2006)
11. Brotman D J, Golden S H, Wittstein I S: The cardiovascular toll of stress. The lancet 370: 1089–1100 (2007)
12. Carter J R, Durocher J J, Kern R P: Neural and cardiovascular responses to emotional stress in humans. American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology 295: R1898-R1903 (2008)
13. Cho D, Ham J, Oh J, Park J, Kim S, Lee N-K, Lee B: Detection of Stress Levels from Biosignals Measured in Virtual Reality Environments Using a Kernel-Based Extreme Learning Machine. Sensors 17: 2435 (2017)

14. Cinaz B, Arnrich B, La Marca R, Tröster G: Monitoring of mental workload levels during an everyday life office-work scenario. Personal and ubiquitous computing 17: 229–239 (2013)
15. Clays E, Bacquer D de, Crasset V, Kittel F, Smet P de, Kornitzer M, Karasek R, Backer G de: The perception of work stressors is related to reduced parasympathetic activity. International archives of occupational and environmental health 84: 185–191 (2011)
16. Cohen J: Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. Aufl, Lawrence Erlbaum Associates, New York, S. 77–81 (1988)
17. Cohen J: Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. Aufl, Lawrence Erlbaum Associates, New York, S. 284–287 (1988)
18. Contrada R J, Krantz D S, Durel L A, Levy L, LaRiccia P J, Anderson J R, Weiss T: Effects of Beta-Adrenergic Activity on T-wave Amplitude. Psychophysiology 26: 488–492 (1989)
19. Crosswell A D, Lockwood K G: Best practices for stress measurement: How to measure psychological stress in health research. Health psychology open 7: 2055102920933072 (2020)
20. Dallman M F, La Fleur S E, Pecoraro N C, Gomez F, Houshyar H, Akana S F: Minireview: Glucocorticoids--Food Intake, Abdominal Obesity, and Wealthy Nations in 2004. Endocrinology 145: 2633–2638 (2004)
21. de Vente W, Olff M, van Amsterdam J G C, Kamphuis J H, Emmelkamp P M G: Physiological differences between burnout patients and healthy controls: blood pressure, heart rate, and cortisol responses. Occupational and environmental medicine 60: 54-61 (2003)
22. Dembowski K: Wearables und Medizintechnik: Elektronik zum Erfassen von Vitalparametern https://www.elektroniknet.de/halbleiter/elektronik-zum-erfassen-von-vitalparametern.184647/seite-2.html (04.05.2022)
23. deutsches Ärzteblatt: Psychische Belastungs-situationen steigern das Herzinfarktrisiko auch bei Gesunden https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/98193/Psychische-Belastungssituationen-steigern-das-Herzinfarktrisiko-auch-bei-Gesunden (24.08.2020)
24. Dhabhar F S, McEwen B S: Acute stress enhances while chronic stress suppresses cell-mediated immunity in vivo: a potential role for leukocyte trafficking. Brain, behavior, and immunity 11: 286–306 (1997)
25. Dhabhar F S, McEwen B S: Enhancing versus suppressive effects of stress hormones on skin immune function. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96: 1059–1064 (1999)
26. Dr. Satow: Stress- und Coping-Inventar (SCI) https://www.drsatow.de/tests/stress-und-coping-inventar/ (28.10.2021)
27. Egger M, Ley M, Hanke S: Emotion Recognition from Physiological Signal Analysis: A Review. Electronic notes in theoretical computer science 343: 35–55 (2019)

28. Fallahi M, Motamedzade M, Heidarimoghadam R, Soltanian A R, Miyake S: Effects of mental workload on physiological and subjective responses during traffic density monitoring: A field study. Applied ergonomics 52: 95–103 (2016)
29. García Pagès E, Arza A, Lazaro J, Puig C, Castro T, Ottaviano M, Arredondo M T, Bernal M L, López-Antón R, La Cámara C D, Gil E, Laguna P, Bailón R, Aguiló J, Garzón-Rey J M: Psychosomatic response to acute emotional stress in healthy students. Frontiers in Physiology 13: 960118 (2023)
30. Giakoumis D, Drosou A, Cipresso P, Tzovaras D, Hassapis G, Gaggioli A, Riva G: Using Activity-Related Behavioural Features towards More Effective Automatic Stress Detection. PloS one 7: e43571 (2012)
31. Giakoumis D, Tzovaras D, Hassapis G: Enhancing Automatic Detection of Frustration Induced During HCI with Moment-based Biosignal Features. ACHI 2012: The Fifth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, IARIA: 342–347 (2012)
32. Giannakakis G, Grigoriadis D, Giannakaki K, Simantiraki O, Roniotis A, Tsiknakis M: Review on psychological stress detection using biosignals. IEEE transactions on affective computing: 1–22 (2019)
33. Giannakakis G, Pediaditis M, Manousos D, Kazantzaki E, Chiarugi F, Simos P G, Marias K, Tsiknakis M: Stress and anxiety detection using facial cues from videos. Biomedical signal processing and control 31: 89–101 (2017)
34. Gorman J M, Sloan R P: Heart rate variability in depressive and anxiety disorders. American heart journal 140: 77–83 (2000)
35. Greene S, Thapliyal H, Caban-Holt A: A Survey of Affective Computing for Stress Detection: Evaluating technologies in stress detection for better health. IEEE Consumer Electronics Magazine 5: 44–56 (2016)
36. Grossman P: Respiration, Stress, and Cardiovascular Function. Psychophysiology 20: 284–300 (1983)
37. Gruss S: Schmerzerkennung anhand psychophysiologischer Signale mithilfe maschineller Lerner. Dissertationsschrift, Universität Ulm (2015)
38. Gruss S, Treister R, Werner P, Traue H C, Crawcour S, Andrade A, Walter S: Pain Intensity Recognition Rates via Biopotential Feature Patterns with Support Vector Machines. PloS one 10: e0140330 (2015)
39. Gunga H C: Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In: Speckmann E-J, Hescheler J, Köhling R (Hrsg) Physiologie, 6. Aufl, Urban & Fischer, München, S. 603–628 (2013)
40. Hamm W, Bogner-Flatz V, Bauer A, Brunner S: FIFA World Cup 2018: effect of emotional stress on conventional heart rate variability metrics. Clinical Research in Cardiology 109: 266–270 (2020)
41. Hazer-Rau D, Meudt S, Daucher A, Spohrs J, Hoffmann H, Schwenker F, Traue H C: The uulmMAC Database-A Multimodal Affective Corpus for Affective Computing in Human-Computer Interaction. Sensors 20: 2308 (2020)
42. Healey J A, Picard R W: Detecting Stress During Real-World Driving Tasks Using Physiological Sensors. IEEE transactions on intelligent transportation

systems : a publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council 6: 156–166 (2005)

43. Heim C, Newport D J, Wagner D, Wilcox M M, Miller A H, Nemeroff C B: The role of early adverse experience and adulthood stress in the prediction of neuroendocrine stress reactivity in women: a multiple regression analysis. Depression and anxiety 15: 117–125 (2002)
44. Hemingway H, Malik M, Marmot M: Social and psychosocial influences on sudden cardiac death, ventricular arrhythmia and cardiac autonomic function. European heart journal 22: 1082–1101 (2001)
45. Hjortskov N, Rissén D, Blangsted A K, Fallentin N, Lundberg U, Søgaard K: The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. European journal of applied physiology 92: 84–89 (2004)
46. Holzinger A, Bruschi M, Eder W: On Interactive Data Visualization of Physiological Low-Cost-Sensor Data with Focus on Mental Stress. Availability, reliability, and security in information systems and HCI IFIP 8.4, 8.9, TC 5 International Cross-Domain Conference; IFIP 8.4, 8.9, TC 5 International Cross-Domain Conference, Springer: 469–480 (2013)
47. Houtman I L: Work-related stress (2007)
48. Isowa T, Ohira H, Murashima S: Immune, endocrine and cardiovascular responses to controllable and uncontrollable acute stress. Biological psychology 71: 202–213 (2006)
49. Jacobs S C, Friedman R, Parker J D, Tofler G H, Jimenez A H, Muller J E, Benson H, Stone P H: Use of skin conductance changes during mental stress testing as an index of autonomic arousal in cardiovascular research. American heart journal 128: 1170–1177 (1994)
50. Kessler H: Kurzlehrbuch Medizinische Psychologie und Soziologie. 3. überarbeitete Auflage, Thieme, Stuttgart, S. 28–33 (2015)
51. Kim D, Seo Y, Cho J, Cho C-H: Detection of Subjects with Higher Self-Reporting Stress Scores using Heart Rate Variability Patterns during the Day. 2008 30th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE: 682–685 (2008)
52. Kim J, André E: Emotion recognition based on physiological changes in music listening. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 30: 2067–2083 (2008)
53. Kim K H, Bang S W, Kim S R: Emotion recognition system using short-term monitoring of physiological signals. Medical & biological engineering & computing 42: 419–427 (2004)
54. Kivimäki M, Virtanen M, Elovainio M, Kouvonen A, Väänänen A, Vahtera J: Work stress in the etiology of coronary heart disease-a meta-analysis. Scandinavian journal of work, environment & health 32: 431–442 (2006)
55. Krantz G, Forsman M, Lundberg U: Consistency in Physiological Stress Responses and Electromyographic Activity during Induced Stress Exposure in Women and Men. Integrative Physiological & Behavioral Science 39: 105–118 (2004)

56. Kreibig S D: Autonomic nervous system activity in emotion: a review. Biological psychology 84: 394–421 (2010)

57. Ladakis I, Chouvarda I: Overview of Biosignal Analysis Methods for the Assessment of Stress. Emerging Science Journal 5: 233–244 (2021)

58. Lampert R: ECG signatures of psychological stress. Journal of electrocardiology 48: 1000–1005 (2015)

59. Lampert R, Jain D, Burg M M, Batsford W P, McPherson C A: Destabilizing Effects of Mental Stress on Ventricular Arrhythmias in Patients With Implantable Cardioverter-Defibrillators. Circulation 101: 158–164 (2000)

60. Lampert R, Shusterman V, Burg M M, Lee F A, Earley C, Goldberg A, McPherson C A, Batsford W P, Soufer R: Effects of Psychologic Stress on Repolarization and Relationship to Autonomic and Hemodynamic Factors. Journal of cardiovascular electrophysiology 16: 372–377 (2005)

61. Larsson S-E, Larsson R, Zhang Q, Cai H, Oberg P A: Effects of psychophysiological stress on trapezius muscles blood flow and electromyography during static load. European journal of applied physiology and occupational physiology 71: 493–498 (1995)

62. Laursen B, Jensen B R, Garde A H, Jørgensen A H: Effect of mental and physical demands on muscular activity during the use of a computer mouse and a keyboard. Scandinavian journal of work, environment & health 28: 215–221 (2002)

63. Lee J, Yoo S K: Recognition of Negative Emotion Using Long Short-Term Memory with Bio-Signal Feature Compression. Sensors 20: 573 (2020)

64. Lewis R S, Weekes N Y, Wang T H: The effect of a naturalistic stressor on frontal EEG asymmetry, stress, and health. Biological psychology 75: 239–247 (2007)

65. Litzcke S M, Schuh H: Stressfolgen Stress, Mobbing und Burn-out am Arbeitsplatz, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 33–50 (2010)

66. Lucini D, Norbiato G, Clerici M, Pagani M: Hemodynamic and Autonomic Adjustments to Real Life Stress Conditions in Humans. Hypertension 39: 184–188 (2002)

67. Lundberg U, Kadefors R, Melin B, Palmerud G, Hassmen P, Engstrom M, Dohns I E: Psychophysiological Stress and EMG Activity of the Trapezius Muscle. International journal of behavioral medicine 1: 354–370 (1994)

68. Masaoka Y, Homma I: The effect of anticipatory anxiety on breathing and metabolism in humans. Respiration physiology 128: 171–177 (2001)

69. McDuff D, Gontarek S, Picard R: Remote Measurement of Cognitive Stress via Heart Rate Variability. 2014 36th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE: 2957–2960 (2014)

70. McEwen B S: The neurobiology of stress: from serendipity to clinical relevance. Brain research 886: 172–189 (2000)

71. McEwen B S, Sapolsky R M: Stress and cognitive function. Current opinion in neurobiology 5: 205–216 (1995)

72. Melillo P, Bracale M, Pecchia L: Nonlinear Heart Rate Variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination. Biomedical engineering online 10: 96 (2011)

73. Minguillon J, Perez E, Lopez-Gordo M A, Pelayo F, Sanchez-Carrion M J: Portable System for Real-Time Detection of Stress Level. Sensors 18: 2504 (2018)

74. Mukamal K J, Maclure M, Muller J E, Sherwood J B, Mittleman M A: Educational Attainment and Myocardial Infarct-Related Congestive Heart Failure (The Determinants of Myocardial Infarction Onset Study). The American journal of cardiology 93: 1288–1291 (2004)

75. Münte T F: Emotionen. In: Speckmann E-J, Hescheler J, Köhling R (Hrsg) Physiologie, 6. Aufl, Urban & Fischer, München, S. 289–296 (2013)

76. Murray I R, Baber C, South A: Towards a definition and working model of stress and its effects on speech. Speech communication 20: 3–12 (1996)

77. Ollander S, Godin C, Charbonnier S, Campagne A: Feature and Sensor Selection for Detection of Driver Stress. Proceedings of the 3rd International Conference on Physiological Computing Systems (PhyCS 2016), SciTePress: 115–122 (2016)

78. Piccirillo G, Elvira S, Bucca C, Viola E, Cacciafesta M, Marigliano V: Abnormal passive head-up tilt test in subjects with symptoms of anxiety power spectral analysis study of heart rate and blood pressure. International journal of cardiology 60: 121–131 (1997)

79. Posner J, Russell J A, Peterson B S: The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. Development and psychopathology 17: 715–734 (2005)

80. Rabkin S W, Mathewson F A L, Tate R B: Chronobiology of Cardiac Sudden Death in Men. JAMA 244: 1357–1358 (1980)

81. Reiche E M V, Nunes S O V, Morimoto H K: Stress, depression, the immune system, and cancer. The Lancet. Oncology 5: 617–625 (2004)

82. Reinhardt T, Schmahl C, Wüst S, Bohus M: Salivary cortisol, heart rate, electrodermal activity and subjective stress responses to the Mannheim Multicomponent Stress Test (MMST). Psychiatry research 198: 106–111 (2012)

83. Ren P, Barreto A, Gao Y, Adjouadi M: Affective Assessment by Digital Processing of the Pupil Diameter. IEEE transactions on affective computing 4: 2–14 (2013)

84. Ribback S: Psychophysiologische Untersuchung mentaler Beanspruchung in simulierten Mensch-Maschine-Interaktionen. Dissertationsschrift, Universität Potsdam (2003)

85. Rimm-Kaufman S E, Kagan J: The Psychological Significance of Changes in Skin Temperature. Motivation and emotion 20: 63–78 (1996)

86. Rissén D, Melin B, Sandsjö L, Dohns I, Lundberg U: Surface EMG and psychophysiological stress reactions in women during repetitive work. European journal of applied physiology 83: 215–222 (2000)

87. Rodrigues S, Paiva J S, Dias D, Aleixo M, Filipe R M, Cunha J P S: Cognitive Impact and Psychophysiological Effects of Stress Using a Biomonitoring Platform. International journal of environmental research and public health 15: 1080 (2018)

88. Rozanski A, Blumenthal J A, Davidson K W, Saab P G, Kubzansky L: The Epidemiology, Pathophysiology, and Management of Psychosocial Risk Factors in Cardiac Practice: The Emerging Field of Behavioral Cardiology. Journal of the American College of Cardiology 45: 637–651 (2005)

89. Rozanski A, Blumenthal J A, Kaplan J: Impact of Psychological Factors on the Pathogenesis of Cardiovascular Disease and Implications for Therapy. Circulation 99: 2192–2217 (1999)

90. Rozanski A, Kubzansky L D: Psychologic functioning and physical health: a paradigm of flexibility. Psychosomatic medicine 67: S47-53 (2005)

91. Russell J A: Affective space is bipolar. Journal of personality and social psychology 37: 345–356 (1979)

92. Salahuddin L, Cho J, Jeong M G, Kim D: Ultra Short Term Analysis of Heart Rate Variability for Monitoring Mental Stress in Mobile Settings. 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE: 4656–4659 (2007)

93. Sanches P, Höök K, Vaara E, Weymann C, Bylund M, Ferreira P, Peira N, Sjölinder M: Mind the body!: designing a mobile stress management application encouraging personal reflection. Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, ACM: 47–56 (2010)

94. Schach S, Traue H C, Hazer-Rau D: The ecgFEAT Toolbox for Automated Cardiovascular Feature Extraction and Analysis. 2016 2nd International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP), IEEE: 67–72 (2015)

95. Schmidt P, Reiss A, Dürichen R, van Laerhoven K: Wearable affect and stress recognition: A review. ArXiv abs/1811.08854 (2018)

96. Schubert C, Lambertz M, Nelesen R A, Bardwell W, Choi J-B, Dimsdale J E: Effects of stress on heart rate complexity-a comparison between short-term and chronic stress. Biological psychology 80: 325–332 (2009)

97. Setz C, Arnrich B, Schumm J, La Marca R, Tröster G, Ehlert U: Discriminating Stress From Cognitive Load Using a Wearable EDA Device. IEEE transactions on information technology in biomedicine 14: 410–417 (2010)

98. Sharma N, Gedeon T: Objective measures, sensors and computational techniques for stress recognition and classification: A survey. Computer methods and programs in biomedicine 108: 1287–1301 (2012)

99. Shu L, Xie J, Yang M, Li Z, Li Z, Liao D, Xu X, Yang X: A Review of Emotion Recognition Using Physiological Signals. Sensors 18: 2074 (2018)

100. Siam A I, Gamel S A, Talaat F M: Automatic stress detection in car drivers based on non-invasive physiological signals using machine learning techniques. Neural Computing and Applications 35: 12891–12904 (2023)

101. Singh M, Bin Queyam A: Stress Detection in Automobile Drivers using Physiological Parameters: A Review. International journal of electronics engineering 5: 1–5 (2013)

102. Skoluda N, Strahler J, Schlotz W, Niederberger L, Marques S, Fischer S, Thoma M V, Spoerri C, Ehlert U, Nater U M: Intra-individual psychological and physiological responses to acute laboratory stressors of different intensity. Psychoneuroendocrinology 51: 227–236 (2015)

103. Steptoe A, Willemsen G, Owen N, Flower L, Mohamed-Ali V: Acute mental stress elicits delayed increases in circulating inflammatory cytokine levels. Clinical science 101: 185–192 (2001)

104. Stevenson I, Ripley H S: Variations in Respiration and in Respiratory Symptoms during Changes in Emotion. Psychosomatic medicine 14: 476–490 (1952)

105. Sun F-T, Kuo C, Cheng H-T, Buthpitiya S, Collins P, Griss M: Activity-Aware Mental Stress Detection Using Physiological Sensors. International Conference on Mobile Computing, Applications, and Services. MobiCASE 2010: Mobile Computing, Applications, and Services, Springer: 211–230 (2012)

106. Taelman J, Vandeput S, Spaepen A, van Huffel S: Influence of Mental Stress on Heart Rate and Heart Rate Variability. 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, Springer: 1366–1369 (2008)

107. Taelman J, Vandeput S, Vlemincx E, Spaepen A, van Huffel S: Instantaneous changes in heart rate regulation due to mental load in simulated office work. European journal of applied physiology 111: 1497–1505 (2011)

108. Taggart P, Sutton P, Redfern C, Batchvarov V N, Hnatkova K, Malik M, James U, Joseph A: The Effect of Mental Stress on the Non-Dipolar Components of the T Wave: Modulation by Hypnosis. Psychosomatic medicine 67: 376–383 (2005)

109. Tarvainen M P, Niskanen J-P, Lipponen J A, Ranta-aho P O, Karjalainen P A: Kubios HRV-Heart rate variability analysis software. Computer methods and programs in biomedicine 113: 210–220 (2014)

110. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. Circulation 93: 1043–1065 (1996)

111. Tharion E, Parthasarathy S, Neelakantan N: Short-term heart rate variability measures in students during examinations. The National medical journal of India 22: 63–66 (2009)

112. TK-Stressstudie 2016 "Entspann dich, Deutschland". Techniker Krankenkasse, Hamburg (2016)

113. Toivonen L, Helenius K, Viitasalo M: Electrocardiographic Repolarization During Stress From Awakening on Alarm Call. Journal of the American College of Cardiology 30: 774–779 (1997)

114. Traina M, Cataldo A, Galullo F, Russo G: Effects of anxiety due to mental stress on heart rate variability in healthy subjects. Minerva psichiatrica 52: 227–231 (2011)

115. Tsigos C, Chrousos G P: Hypothalamic–pituitary–adrenal axis, neuroendocrine factors and stress. Journal of psychosomatic research 53: 865–871 (2002)

116. Tulen J, Moleman P, van Steenis H G, Boomsma F: Characterization of Stress Reactions to the Stroop Color Word Test. Pharmacology, biochemistry, and behavior 32: 9–15 (1989)

117. Ulstein I, Bruun Wyller T, Engedal K: The relative stress scale, a useful instrument to identify various aspects of carer burden in dementia? International journal of geriatric psychiatry 22: 61–67 (2007)

118. Ulstein I, Wyller T B, Engedal K: High score on the Relative Stress Scale, a marker of possible psychiatric disorder in family carers of patients with dementia. International journal of geriatric psychiatry 22: 195–202 (2007)

119. Valenza G, Citi L, Lanatá A, Scilingo E P, Barbieri R: Revealing Real-Time Emotional Responses: a Personalized Assessment based on Heartbeat Dynamics. Scientific reports 4: 4998 (2014)

120. van Lien R, Neijts M, Willemsen G, Geus E J C de: Ambulatory measurement of the ECG T-wave amplitude. Psychophysiology 52: 225–237 (2015)

121. Vila G, Godin C, Charbonnier S, Labyt E, Sakri O, Campagne A: Pressure-Specific Feature Selection for Acute Stress Detection From Physiological Recordings. 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE: 2341–2346 (2018)

122. Vinkers C H, Penning R, Hellhammer J, Verster J C, Klaessens J H G M, Olivier B, Kalkman C J: The effect of stress on core and peripheral body temperature in humans. Stress 16: 520–530 (2013)

123. Visnovcova Z, Mestanik M, Javorka M, Mokra D, Gala M, Jurko A, Calkovska A, Tonhajzerova I: Complexity and time asymmetry of heart rate variability are altered in acute mental stress. Physiological measurement 35: 1319–1334 (2014)

124. von Känel R, Dimsdale J E: Effects of sympathetic activation by adrenergic infusions on hemostasis in vivo. European journal of haematology 65: 357–369 (2000)

125. Vuksanović V, Gal V: Heart rate variability in mental stress aloud. Medical Engineering & Physics 29: 344–349 (2007)

126. Wahlström J, Lindegård A, Ahlborg G, Ekman A, Hagberg M: Perceived muscular tension, emotional stress, psychological demands and physical load during VDU work. International archives of occupational and environmental health 76: 584–590 (2003)

127. Weiss B, Field R: Electrocardiographic indices of emotional stress. The American journal of psychiatry 113: 348–351 (1956)

128. Wijsman J, Grundlehner B, Penders J, Hermens H: Trapezius Muscle EMG as Predictor of Mental Stress. Wireless Health 2010, ACM: 155–163 (2010)

129. Zhai J, Barreto A B: Stress Detection in Computer Users Based on Digital Signal Processing of Noninvasive Physiological Variables. 28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE: 1355–1358 (2006)

130. Zhai J, Barreto A B, Chin C, Li C: Realization of stress detection using psychophysiological signals for improvement of human-computer interaction. Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2005, IEEE: 415–420 (2005)

131. Zheng B S, Murugappan M, Yaacob S, Murugappan S: Human emotional stress analysis through time domain electromyogram features. 2013 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, IEEE: 172–177 (2013)

7 Anhang

A1: Deskriptive Statistik der EKG-Features

Auflistung berechneter Lage- und Streuungsmaße zu den jeweiligen EKG-Features (1. Spalte), abhängig von der jeweiligen Sequenz (2. Spalte). In der letzten Spalte sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test zu finden und jeweils dahinter in Klammern das Signifikanzniveau. 95 % KI von x̄ OG: Obergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; 95 % KI von x̄ UG: Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; Md: Median; SD: Standardabweichung; x̄: Mittelwert.

Feature	Sequenz	x̄	Md	SD	95 % KI von x̄ UG	95 % KI von x̄ OG	Normal-verteilung
3_ECG_A_P_mean	Normal	0,1519	0,1517	0,0592	0,1362	0,1676	neg. (p=0,007)
	Overload	0,1518	0,1430	0,0590	0,1362	0,1675	neg. (p<0,001)
	Frustration	0,1568	0,1472	0,0580	0,1414	0,1722	neg. (p<0,001)
7_ECG_A_T_mean	Normal	0,1762	0,1719	0,1103	0,1469	0,2054	pos. (p=0,949)
	Overload	0,1765	0,1699	0,1037	0,1490	0,2040	pos. (p=0,317)
	Frustration	0,1893	0,1791	0,1105	0,1600	0,2186	pos. (p=0,776)
9_ECG_I_PRint_mean	Normal	231,3070	170,0523	127,4064	197,5016	265,1125	neg. (p<0,001)
	Overload	232,2811	168,9801	125,2601	199,0451	265,5170	neg. (p<0,001)
	Frustration	226,0774	172,8550	126,6843	192,4636	259,6913	neg. (p<0,001)
12_ECG_I_QT_mean	Normal	385,6141	345,8194	98,3262	359,5246	411,7035	neg. (p<0,001)
	Overload	390,4457	359,3715	98,0909	364,4187	416,4727	neg. (p<0,001)
	Frustration	384,8738	342,1411	100,9029	358,1007	411,6469	neg. (p<0,001)
13_ECG_I_RT_mean	Normal	342,8270	306,8387	97,1945	317,0378	368,6162	neg. (p<0,001)
	Overload	347,6956	319,4896	97,1909	321,9074	373,4838	neg. (p<0,001)
	Frustration	342,0447	298,4031	99,7909	315,5666	368,5227	neg. (p<0,001)
14_ECG_I_ST_mean	Normal	86,9576	82,8859	43,9073	75,3075	98,6078	neg. (p=0,001)
	Overload	89,1224	80,9277	45,4727	77,0569	101,1880	neg. (p=0,002)
	Frustration	86,8767	85,3704	40,9444	76,0127	97,7407	neg. (p=0,001)
15_ECG_hrv_meanRR	Normal	705,4019	700,0370	103,3304	677,9847	732,8191	pos. (p=0,115)
	Overload	707,2763	703,3136	105,1418	679,3784	735,1741	pos. (p=0,202)
	Frustration	711,0467	697,7573	102,6954	683,7979	738,2954	pos. (p=0,051)
17_ECG_hrv_SDNN	Normal	75,7942	68,8473	34,7055	66,5856	85,0028	neg. (p<0,001)
	Overload	85,2528	72,4217	48,2920	72,4392	98,0664	neg. (p<0,001)
	Frustration	77,8542	65,7132	44,9345	65,9315	89,7769	neg. (p<0,001)
18_ECG_hrv_RMSSD	Normal	63,6328	48,1268	48,6621	50,7210	76,5446	neg. (p<0,001)
	Overload	77,1581	49,5558	73,9229	57,5438	96,7725	neg. (p<0,001)
	Frustration	65,8852	46,9274	54,0927	51,5325	80,2379	neg. (p<0,001)
19_ECG_hrv_NN50	Normal	54,2105	43,0000	39,2686	43,7912	64,6299	neg. (p<0,001)
	Overload	53,2807	43,0000	36,2116	43,6725	62,8889	neg. (p=0,001)
	Frustration	50,2456	37,0000	37,2363	40,3655	60,1257	neg. (p<0,001)
20_ECG_hrv_pNN50	Normal	9,3333	6,5789	7,9953	7,2119	11,4548	neg. (p<0,001)
	Overload	9,4631	6,7901	7,6920	7,4221	11,5040	neg. (p<0,001)

	Frustration	9,6915	6,7437	8,2706	7,4970	11,8860	neg. (p<0,001)
21_ECG_hrv_peak_VLF	Normal	0,0363	0,0367	0,0047	0,0350	0,0375	neg. (p<0,001)
	Overload	0,0361	0,0367	0,0048	0,0349	0,0374	neg. (p<0,001)
	Frustration	0,0355	0,0367	0,0046	0,0343	0,0367	neg. (p<0,001)
22_ECG_hrv_peak_LF	Normal	0,0880	0,0867	0,0198	0,0828	0,0933	pos. (p=0,111)
	Overload	0,0971	0,1033	0,0207	0,0916	0,1026	neg. (p<0,001)
	Frustration	0,0913	0,0900	0,0169	0,0868	0,0958	pos. (p=0,563)
23_ECG_hrv_peak_HF	Normal	0,1766	0,1633	0,0364	0,1669	0,1863	neg. (p<0,001)
	Overload	0,1763	0,1700	0,0249	0,1696	0,1829	neg. (p<0,001)
	Frustration	0,1747	0,1633	0,0341	0,1656	0,1837	neg. (p<0,001)
24_ECG_hrv_ap_VLF	Normal	164,8199	73,8378	299,0310	85,4763	244,1635	neg. (p<0,001)
	Overload	185,8805	98,8096	228,7505	125,1848	246,5762	neg. (p<0,001)
	Frustration	224,2258	104,6324	356,5493	129,6205	318,8311	neg. (p<0,001)
25_ECG_hrv_ap_LF	Normal	2460,2501	1620,8148	3514,8477	1527,6355	3392,8647	neg. (p<0,001)
	Overload	2838,5976	1436,6622	4293,3866	1699,4088	3977,7864	neg. (p<0,001)
	Frustration	4444,2465	1868,8211	10011,1358	1787,9347	7100,5584	neg. (p<0,001)
26_ECG_hrv_ap_HF	Normal	1038,4790	304,5879	3593,2420	85,0636	1991,8944	neg. (p<0,001)
	Overload	1713,9862	218,6170	5104,3559	359,6183	3068,3541	neg. (p<0,001)
	Frustration	1877,7056	243,0562	5615,8813	387,6117	3367,7995	neg. (p<0,001)
27_ECG_hrv_apl_VLF	Normal	4,4217	4,3019	1,1326	4,1212	4,7222	pos. (p=0,813)
	Overload	4,6797	4,5932	1,0505	4,4010	4,9585	pos. (p=0,698)
	Frustration	4,6334	4,6505	1,3010	4,2882	4,9787	pos. (p=0,202)
28_ECG_hrv_apl_LF	Normal	7,3710	7,3907	0,8868	7,1357	7,6063	pos. (p=0,692)
	Overload	7,3743	7,2701	1,0285	7,1014	7,6472	pos. (p=0,526)
	Frustration	7,5706	7,5331	1,1497	7,2656	7,8757	neg. (p=0,018)
29_ECG_hrv_apl_HF	Normal	5,7307	5,7190	1,2390	5,4019	6,0594	neg. (p=0,003)
	Overload	5,8480	5,3873	1,5314	5,4417	6,2543	neg. (p=0,002)
	Frustration	5,7917	5,4933	1,5714	5,3747	6,2086	neg. (p=0,001)
30_ECG_hrv_rp_VLF	Normal	4,8006	4,0379	3,0763	3,9844	5,6169	neg. (p<0,001)
	Overload	5,8522	4,8830	3,4739	4,9305	6,7740	neg. (p=0,001)
	Frustration	5,1151	3,6379	3,5657	4,1689	6,0612	neg. (p<0,001)
31_ECG_hrv_rp_LF	Normal	77,6199	79,5691	10,4034	74,8595	80,3803	neg. (p<0,001)
	Overload	74,2389	79,0804	14,3424	70,4334	78,0445	neg. (p<0,001)
	Frustration	78,3095	82,4893	12,5851	74,9702	81,6487	neg. (p<0,001)
32_ECG_hrv_rp_HF	Normal	17,5185	15,8262	10,7111	14,6765	20,3605	neg. (p<0,001)
	Overload	19,8441	14,2698	14,7267	15,9366	23,7516	neg. (p<0,001)
	Frustration	16,5200	12,6606	12,6692	13,1584	19,8816	neg. (p<0,001)
33_ECG_hrv_np_LF	Normal	81,6146	83,0925	11,1052	78,6680	84,5612	neg. (p<0,001)
	Overload	78,9617	84,7204	15,2561	74,9137	83,0097	neg. (p<0,001)
	Frustration	82,6011	86,3481	13,1118	79,1221	86,0801	neg. (p<0,001)
34_ECG_hrv_np_HF	Normal	18,3218	16,8869	11,0432	15,3916	21,2519	neg. (p<0,001)
	Overload	20,9704	15,2709	15,1902	16,9398	25,0009	neg. (p<0,001)
	Frustration	17,3408	13,6412	13,0379	13,8814	20,8002	neg. (p<0,001)

35_ECG_hrv_tp	Normal	3667,4751	2148,4647	7287,4924	1733,8431	5601,1071	neg. (p<0,001)
	Overload	4745,7417	1899,5873	9470,4230	2232,9003	7258,5832	neg. (p<0,001)
	Frustration	6553,0198	2369,5831	15713,8072	2383,5856	10722,4541	neg. (p<0,001)
36_ECG_hrv_LFHF ratio	Normal	6,5018	4,9205	4,8842	5,2059	7,7978	neg. (p<0,001)
	Overload	6,3353	5,5478	5,0143	5,0048	7,6658	neg. (p<0,001)
	Frustration	8,0184	6,3299	5,9627	6,4363	9,6005	neg. (p<0,001)
37_ECG_hrv_SD1	Normal	44,2357	33,7978	33,0852	35,4570	53,0144	neg. (p<0,001)
	Overload	53,3291	34,8903	49,8742	40,0957	66,5625	neg. (p<0,001)
	Frustration	45,9266	32,8713	37,0628	36,0925	55,7606	neg. (p<0,001)
38_ECG_hrv_SD2	Normal	79,9143	73,2296	35,1678	70,5830	89,2456	neg. (p<0,001)
	Overload	88,1040	75,6709	50,0958	74,8118	101,3962	neg. (p<0,001)
	Frustration	81,5857	69,4907	48,1572	68,8079	94,3635	neg. (p<0,001)
39_ECG_hrv_SD2SD1 ratio	Normal	2,0673	2,0703	0,5325	1,9260	2,2086	pos. (p=0,663)
	Overload	2,0258	1,9902	0,6117	1,8635	2,1881	pos. (p=0,262)
	Frustration	2,0040	2,0422	0,5639	1,8544	2,1536	pos. (p=0,499)
40_ECG_I_QTc(bX)	Normal	462,3234	415,7136	121,5700	430,0665	494,5802	neg. (p<0,001)
	Overload	467,5738	419,1523	121,0378	435,4582	499,6894	neg. (p<0,001)
	Frustration	459,4765	412,1794	123,4618	426,7177	492,2353	neg. (p<0,001)

A2: Deskriptive Statistik der Atmungs-Features

Auflistung berechneter Lage- und Streuungsmaße zu den jeweiligen Atmungs-Features (1. Spalte), abhängig von der jeweiligen Sequenz (2. Spalte). In der letzten Spalte sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test zu finden und jeweils dahinter in Klammern das Signifikanzniveau.

95 % KI von x̄ OG: Obergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; 95 % KI von x̄ UG: Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; Md: Median; SD: Standardabweichung; x̄: Mittelwert.

Feature	Sequenz	x̄	Md	SD	95 % KI von x̄ UG	95 % KI von x̄ OG	Normal-verteilung
48_Resp_A_MAV	Normal	0,1207	0,1146	0,0317	0,1123	0,1291	pos. (p=0.436)
	Overload	0,1230	0,1169	0,0325	0,1144	0,1316	pos. (p=0.159)
	Frustration	0,1231	0,1243	0,0382	0,1130	0,1332	neg. (p<0.001)
53_Resp_F_zc	Normal	5,2055	5,0503	1,0053	4,9387	5,4723	pos. (p=0.303)
	Overload	5,0984	5,0677	0,9651	4,8423	5,3545	pos. (p=0.181)
	Frustration	5,3580	5,1206	1,2172	5,0350	5,6810	neg. (p=0.001)
54_Resp_F_fmed	Normal	0,3530	0,3574	0,0635	0,3362	0,3699	pos. (p=0.156)
	Overload	0,3484	0,3569	0,0593	0,3327	0,3641	pos. (p=0.08)
	Frustration	0,3488	0,3483	0,0714	0,3298	0,3677	pos. (p=0.865)
55_Resp_F_fmode	Normal	0,2321	0,2228	0,0901	0,2082	0,2560	pos. (p=0.309)
	Overload	0,2299	0,2221	0,0940	0,2049	0,2548	pos. (p=0.136)
	Frustration	0,2260	0,2217	0,0902	0,2021	0,2499	pos. (p=0.891)
56_Resp_F_fmean	Normal	0,4064	0,4106	0,0547	0,3919	0,4209	pos. (p=0.645)
	Overload	0,4043	0,4017	0,0523	0,3904	0,4182	pos. (p=0.142)
	Frustration	0,4094	0,4043	0,0639	0,3924	0,4264	neg. (p=0.008)
57_Resp_F_bw	Normal	0,1763	0,1814	0,0346	0,1671	0,1855	pos. (p=0.506)
	Overload	0,1698	0,1718	0,0378	0,1597	0,1798	neg. (p=0.007)
	Frustration	0,1763	0,1784	0,0457	0,1642	0,1884	neg. (p=0.008)
58_Resp_F_cf	Normal	0,0881	0,0907	0,0173	0,0835	0,0927	pos. (p=0.506)
	Overload	0,0849	0,0859	0,0189	0,0799	0,0899	neg. (p=0.007)
	Frustration	0,0881	0,0892	0,0228	0,0821	0,0942	neg. (p=0.008)
59_Resp_S_median	Normal	0,4391	0,4363	0,0450	0,4271	0,4510	neg. (p=0.002)
	Overload	0,4438	0,4409	0,0456	0,4317	0,4559	pos. (p=0.123)
	Frustration	0,4303	0,4230	0,0419	0,4192	0,4414	neg. (p=0.032)
61_Resp_S_AI	Normal	59,4492	59,3940	6,0193	57,8520	61,0463	neg. (p=0.003)
	Overload	60,2425	59,8449	6,1998	58,5975	61,8875	pos. (p=0.157)
	Frustration	58,3552	57,4075	5,7371	56,8329	59,8775	neg. (p=0.076)
62_Resp_S_AIW	Normal	0,4554	0,4542	0,0464	0,4430	0,4677	neg. (p=0.002)
	Overload	0,4613	0,4586	0,0473	0,4487	0,4738	pos. (p=0.164)
	Frustration	0,4463	0,4400	0,0441	0,4346	0,4580	neg. (p=0.042)
70_Resp_L_ldf	Normal	0,9892	0,9915	0,0075	0,9872	0,9911	neg. (p<0.001)
	Overload	0,9893	0,9915	0,0061	0,9877	0,9910	neg. (p=0.008)
	Frustration	0,9902	0,9918	0,0062	0,9886	0,9919	neg. (p=0.001)
72_Resp_V_	Normal	0,0383	0,0317	0,0245	0,0319	0,0448	neg. (p<0.001)

var	Overload	0,0408	0,0305	0,0273	0,0335	0,0480	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0398	0,0308	0,0337	0,0308	0,0487	neg. (p<0.001)

A3: Deskriptive Statistik der EDA-Features

Auflistung berechneter Lage- und Streuungsmaße zu den jeweiligen EDA-Features (1. Spalte), abhängig von der jeweiligen Sequenz (2. Spalte). In der letzten Spalte sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test zu finden und jeweils dahinter in Klammern das Signifikanzniveau. 95 % KI von x̄ OG: Obergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; 95 % KI von x̄ UG: Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; Md: Median; SD: Standardabweichung; x̄: Mittelwert.

Feature	Sequenz	x̄	Md	SD	95 % KI von x̄ UG	95 % KI von x̄ OG	Normal-verteilung
76_EDA_A_PEAK	Normal	36,0834	32,2082	20,0079	30,7746	41,3922	neg. (p<0.001)
	Overload	35,7144	31,1329	19,1647	30,6293	40,7995	neg. (p<0.001)
	Frustration	36,9249	33,1001	20,1657	31,5742	42,2756	neg. (p=0.001)
77_EDA_A_P2P	Normal	1,7498	1,4433	1,0538	1,4702	2,0295	neg. (p<0.001)
	Overload	1,7074	1,4300	0,9837	1,4464	1,9684	neg. (p<0.001)
	Frustration	1,8691	1,6032	1,1481	1,5644	2,1737	neg. (p<0.001)
78_EDA_A_RMS	Normal	35,1739	31,5067	19,5934	29,9751	40,3727	neg. (p<0.001)
	Overload	34,8416	30,7198	18,8147	29,8494	39,8338	neg. (p<0.001)
	Frustration	35,9595	32,2486	19,7258	30,7255	41,1935	neg. (p=0.001)
79_EDA_A_MLocMaxV	Normal	35,1672	31,5171	19,5768	29,9728	40,3616	neg. (p<0.001)
	Overload	34,8419	30,7335	18,8063	29,8519	39,8319	neg. (p<0.001)
	Frustration	35,9489	32,2301	19,7081	30,7196	41,1781	neg. (p=0.001)
82_EDA_A_MAV	Normal	35,1677	31,5032	19,5911	29,9695	40,3659	neg. (p<0.001)
	Overload	34,8358	30,7193	18,8130	29,8440	39,8276	neg. (p<0.001)
	Frustration	35,9521	32,2419	19,7224	30,7190	41,1852	neg. (p=0.001)
83_EDA_A_MAVFD	Normal	0,0062	0,0060	0,0009	0,0059	0,0064	neg. (p=0.007)
	Overload	0,0062	0,0060	0,0009	0,0059	0,0064	neg. (p=0.001)
	Frustration	0,0063	0,0061	0,0010	0,0060	0,0066	neg. (p=0.001)
84_EDA_A_MAVFDN	Normal	0,0246	0,0244	0,0104	0,0218	0,0273	pos. (p=0.096)
	Overload	0,0243	0,0243	0,0095	0,0218	0,0268	pos. (p=0.076)
	Frustration	0,0235	0,0225	0,0099	0,0209	0,0261	neg. (p=0.037)
87_EDA_F_fmean	Normal	6,61E-06	4,77E-06	4,87E-06	5,31E-06	7,90E-06	neg. (p<0.001)
	Overload	6,92E-06	4,93E-06	5,73E-06	5,40E-06	8,44E-06	neg. (p<0.001)
	Frustration	7,42E-06	5,47E-06	7,60E-06	5,41E-06	9,44E-06	neg. (p<0.001)
88_EDA_S_median	Normal	0,2252	0,2251	0,0002	0,2251	0,2252	neg. (p<0.001)
	Overload	0,2252	0,2251	0,0002	0,2251	0,2252	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,2252	0,2252	0,0002	0,2252	0,2252	neg. (p<0.001)
92_EDA_S_me	Normal	0,4655	0,3828	0,3432	0,3745	0,5566	neg. (p<0.001)
	Overload	0,4504	0,3641	0,3191	0,3657	0,5351	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,5024	0,4022	0,3754	0,4028	0,6020	neg. (p<0.001)
93_EDA_S_sd	Normal	0,0847	0,0646	0,0630	0,0679	0,1014	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0804	0,0574	0,0588	0,0648	0,0960	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0899	0,0679	0,0644	0,0728	0,1070	neg. (p<0.001)
94_EDA_E_	Normal	-0,0725	-0,0764	0,0153	-0,0765	-0,0684	pos. (p=0.059)

Aprox	Overload	-0,0728	-0,0765	0,0152	-0,0768	-0,0688	neg. (p=0.031)
	Frustration	-0,0708	-0,0732	0,0146	-0,0747	-0,0669	neg. (p=0.049)
95_EDA_E_ Fuzzy	Normal	3,66E-05	3,63E-05	1,07E-05	3,38E-05	3,95E-05	pos. (p=0.716)
	Overload	3,74E-05	3,70E-05	8,82E-06	3,50E-05	3,97E-05	pos. (p=0.134)
	Frustration	3,93E-05	3,89E-05	1,14E-05	3,62E-05	4,23E-05	pos. (p=0.744)
96_EDA_E_ Sample	Normal	-0,1469	-0,1442	0,0546	-0,1614	-0,1324	pos. (p=0.083)
	Overload	-0,1449	-0,1408	0,0497	-0,1581	-0,1317	pos. (p=0.236)
	Frustration	-0,1409	-0,1367	0,0510	-0,1545	-0,1274	pos. (p=0.077)
97_EDA_E_ Shannon	Normal	6,3575	6,3647	0,0338	6,3485	6,3665	neg. (p<0.001)
	Overload	6,3590	6,3633	0,0309	6,3508	6,3672	neg. (p=0.011)
	Frustration	6,3553	6,3604	0,0300	6,3473	6,3633	neg. (p=0.049)
98_EDA_E_ Spectral	Normal	1,23E-04	8,89E-05	9,82E-05	9,70E-05	1,49E-04	neg. (p<0.001)
	Overload	1,27E-04	8,38E-05	1,09E-04	9,80E-05	1,56E-04	neg. (p<0.001)
	Frustration	1,36E-04	9,94E-05	1,38E-04	9,96E-05	1,73E-04	neg. (p<0.001)
99_EDA_L_ldf	Normal	0,9745	0,9815	0,0222	0,9687	0,9804	neg. (p<0.001)
	Overload	0,9785	0,9810	0,0133	0,9749	0,9820	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,9735	0,9779	0,0187	0,9685	0,9785	neg. (p<0.001)
100_EDA_L_ pldf	Normal	1,2229	1,2121	0,1093	1,1939	1,2519	pos. (p=0.841)
	Overload	1,2221	1,2163	0,0961	1,1966	1,2476	pos. (p=0.051)
	Frustration	1,2103	1,1955	0,1066	1,1820	1,2386	pos. (p=0.691)
101_EDA_V_ var	Normal	0,5553	0,2759	0,8225	0,3370	0,7735	neg. (p<0.001)
	Overload	0,4900	0,2328	0,6961	0,3053	0,6747	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,7137	0,2535	1,3573	0,3536	1,0739	neg. (p<0.001)
102_EDA_V_ std	Normal	0,4701	0,3811	0,3209	0,3849	0,5552	neg. (p<0.001)
	Overload	0,4554	0,3695	0,2992	0,3761	0,5348	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,5041	0,4084	0,3502	0,4112	0,5970	neg. (p<0.001)

A4: Deskriptive Statistik der Temperatur-Features

Auflistung berechneter Lage- und Streuungsmaße zu den jeweiligen Temperatur-Features (1. Spalte), abhängig von der jeweiligen Sequenz (2. Spalte). In der letzten Spalte sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test zu finden und jeweils dahinter in Klammern das Signifikanzniveau.

95 % KI von x̄ OG: Obergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; 95 % KI von x̄ UG: Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; Md: Median; SD: Standardabweichung; x̄: Mittelwert.

Feature	Sequenz	x̄	Md	SD	95 % KI von x̄ UG	95 % KI von x̄ OG	Normal-verteilung
105_Temp_A_PEAK	Normal	69,0680	82,3898	26,7455	61,9715	76,1646	neg. (p<0.001)
	Overload	65,4204	77,0772	25,9120	58,5450	72,2958	neg. (p<0.001)
	Frustration	74,7225	85,6137	25,4254	67,9762	81,4687	neg. (p<0.001)
106_Temp_A_P2P	Normal	0,7428	0,7617	0,1018	0,7158	0,7698	neg. (p=0.007)
	Overload	0,7768	0,7917	0,1294	0,7424	0,8111	pos. (p=0.231)
	Frustration	0,7839	0,7926	0,1190	0,7523	0,8155	neg. (p=0.033)
107_Temp_A_RMS	Normal	68,7223	81,9053	26,7179	61,6331	75,8115	neg. (p<0.001)
	Overload	65,0563	76,7142	25,8805	58,1892	71,9233	neg. (p<0.001)
	Frustration	74,3647	85,2661	25,3996	67,6253	81,1042	neg. (p<0.001)
108_Temp_A_MLocMaxV	Normal	68,7379	81,9182	26,7188	61,6485	75,8273	neg. (p<0.001)
	Overload	65,0721	76,7311	25,8813	58,2049	71,9393	neg. (p<0.001)
	Frustration	74,3813	85,2849	25,4008	67,6415	81,1210	neg. (p<0.001)
109_Temp_A_MLocMinV	Normal	68,6972	81,8752	26,7165	61,6084	75,7861	neg. (p<0.001)
	Overload	65,0312	76,6899	25,8794	58,1645	71,8979	neg. (p<0.001)
	Frustration	74,3397	85,2437	25,3985	67,6006	81,0789	neg. (p<0.001)
111_Temp_A_MAV	Normal	68,7220	81,9048	26,7180	61,6328	75,8113	neg. (p<0.001)
	Overload	65,0560	76,7140	25,8806	58,1889	71,9230	neg. (p<0.001)
	Frustration	74,3644	85,2659	25,3997	67,6250	81,1039	neg. (p<0.001)
121_Temp_S_me	Normal	0,0808	0,0829	0,0264	0,0738	0,0878	neg. (p=0.002)
	Overload	0,0939	0,0922	0,0389	0,0836	0,1042	neg. (p=0.035)
	Frustration	0,0888	0,0865	0,0306	0,0807	0,0969	neg. (p=0.018)
124_Temp_E_Fuzzy	Normal	6,70E-05	6,73E-05	7,24E-06	6,50E-05	6,89E-05	pos. (p=0.859)
	Overload	6,56E-05	6,43E-05	1,04E-05	6,28E-05	6,84E-05	neg. (p=0.01)
	Frustration	6,77E-05	6,83E-05	7,47E-06	6,57E-05	6,97E-05	pos. (p=0.321)
130_Temp_V_var	Normal	0,0328	0,0355	0,0129	0,0294	0,0362	neg. (p=0.009)
	Overload	0,0358	0,0384	0,0160	0,0316	0,0400	neg. (p=0.004)
	Frustration	0,0388	0,0396	0,0148	0,0349	0,0427	pos. (p=0.137)
131_Temp_V_std	Normal	0,1403	0,1437	0,0212	0,1347	0,1459	neg. (p=0.003)
	Overload	0,1499	0,1490	0,0297	0,1420	0,1577	pos. (p=0.108)
	Frustration	0,1478	0,1477	0,0251	0,1411	0,1544	pos. (p=0.06)
132_Temp_V_r	Normal	0,7428	0,7617	0,1018	0,7158	0,7698	neg. (p=0.007)
	Overload	0,7768	0,7917	0,1294	0,7424	0,8111	pos. (p=0.231)
	Frustration	0,7839	0,7926	0,1190	0,7523	0,8155	neg. (p=0.033)

A5: Deskriptive Statistik der EMG-Features

Auflistung berechneter Lage- und Streuungsmaße zu den jeweiligen EMG-Features (1. Spalte), abhängig von der jeweiligen Sequenz (2. Spalte). In der letzten Spalte sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test zu finden und jeweils dahinter in Klammern das Signifikanzniveau. 95 % KI von x̄ OG: Obergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; 95 % KI von x̄ UG: Untergrenze des 95 % Konfidenzintervalls des Mittelwertes; Md: Median; SD: Standardabweichung; x̄: Mittelwert.

Feature	Sequenz	x̄	Md	SD	95 % KI von x̄ UG	95 % KI von x̄ OG	Normal-verteilung
134_EMG_A_PEAK	Normal	0,1009	0,0731	0,0756	0,0809	0,1210	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0944	0,0690	0,0647	0,0773	0,1116	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0935	0,0761	0,0646	0,0764	0,1107	neg. (p<0.001)
135_EMG_A_P2P	Normal	0,1867	0,1319	0,1494	0,1471	0,2263	neg. (p<0.001)
	Overload	0,1760	0,1263	0,1406	0,1387	0,2134	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,1738	0,1352	0,1350	0,1379	0,2096	neg. (p<0.001)
136_EMG_A_RMS	Normal	0,0228	0,0150	0,0178	0,0181	0,0275	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0214	0,0158	0,0168	0,0170	0,0259	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0210	0,0169	0,0158	0,0168	0,0252	neg. (p<0.001)
140_EMG_A_MAV	Normal	0,0174	0,0114	0,0135	0,0138	0,0210	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0164	0,0116	0,0128	0,0130	0,0198	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0160	0,0126	0,0120	0,0129	0,0192	neg. (p<0.001)
145_EMG_F_zc	Normal	576,5088	592,3311	45,5366	564,4263	588,5912	neg. (p<0.001)
	Overload	576,6707	591,2814	45,0098	564,7280	588,6134	neg. (p<0.001)
	Frustration	579,7130	597,4326	42,6135	568,4061	591,0199	neg. (p<0.001)
146_EMG_F_fmed	Normal	55,1647	56,6978	8,0349	53,0328	57,2967	neg. (p=0.003)
	Overload	55,1479	56,7977	7,8120	53,0751	57,2207	neg. (p=0.001)
	Frustration	55,6523	57,2350	7,4344	53,6797	57,6250	neg. (p=0.003)
148_EMG_F_fmean	Normal	59,1199	61,0048	6,5063	57,3936	60,8463	neg. (p<0.001)
	Overload	59,1444	60,8686	6,3118	57,4697	60,8192	neg. (p<0.001)
	Frustration	59,5440	61,3314	5,9916	57,9542	61,1338	neg. (p<0.001)
158_EMG_E_Fuzzy	Normal	0,0467	0,0200	0,0539	0,0324	0,0610	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0421	0,0224	0,0499	0,0289	0,0554	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0411	0,0272	0,0465	0,0288	0,0534	neg. (p<0.001)
164_EMG_V_var	Normal	0,0010	0,0003	0,0018	0,0005	0,0014	neg. (p<0.001)
	Overload	0,0008	0,0003	0,0018	0,0004	0,0013	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,0008	0,0003	0,0016	0,0003	0,0012	neg. (p<0.001)
166_EMG_V_r	Normal	0,1867	0,1319	0,1494	0,1471	0,2263	neg. (p<0.001)
	Overload	0,1760	0,1263	0,1406	0,1387	0,2134	neg. (p<0.001)
	Frustration	0,1738	0,1352	0,1350	0,1379	0,2096	neg. (p<0.001)

A6: Korrelationsanalyse der EKG-Features

Auflistung der berechneten Korrelationen zwischen den Sequenzen der jeweiligen EKG-Features. Es sind jeweils die Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 4 und 5 zu finden sind, mit den entsprechenden Sequenzen gegeneinander aufgetragen. Die zugehörigen Werte stellen den Korrelationskoeffizienten (ρ) dar. Grün hinterlegt sind die Werte, die für die Fragestellung dieser Arbeit von Relevanz sind.

*: die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant; **: die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant.

Feature-nummer		3			7			9			12			14			30		
	Sequenz	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration
	Normal		0,962**	0,935**	-0,079	-0,071	-0,097	-0,197	-0,203	-0,188	0,321*	-0,383**	-0,350**	0,265*	0,269*	0,339**	-0,034	0,131	-0,037
3	Overload	0,962**		0,946**	-0,095	-0,056	-0,084	-0,154	-0,158	-0,139	-0,225	-0,298*	-0,259	0,228	0,219	0,291*	-0,018	0,162	-0,036
	Frustration	0,935**	0,946**		-0,123	-0,068	-0,097	-0,163	-0,152	-0,118	-0,278*	-0,292*	-0,307*	0,268*	0,258	0,308*	0,049	0,094	-0,069
	Normal	-0,079	-0,095	-0,123		0,970**	0,949**	-0,200	-0,231	-0,123	-0,207	-0,220	-0,162	-0,259	-0,266*	-0,246	0,229	-0,105	0,063
7	Overload	-0,071	-0,056	-0,068	0,970**		0,914**	-0,178	-0,210	-0,088	-0,166	-0,179	-0,116	-0,262*	-0,281*	-0,249	0,262*	-0,109	0,029
	Frustration	-0,097	-0,084	-0,097	0,949**	0,914**		-0,189	-0,200	-0,095	-0,224	-0,197	-0,188	-0,228	-0,238	-0,248	0,211	-0,056	0,093
	Normal	-0,197	-0,154	-0,163	-0,200	-0,178	-0,189		0,970**	0,953**	0,683**	0,615**	0,645**	-0,516**	-0,525**	-0,492**	0,163	0,300*	-0,015
9	Overload	-0,203	-0,158	-0,152	-0,231	-0,210	-0,200	0,970**		0,950**	0,705**	0,673**	0,675**	-0,499**	-0,508**	-0,486**	0,122	0,306*	-0,036
	Frustration	-0,188	-0,139	-0,118	-0,123	-0,088	-0,095	0,953**	0,950**		0,684**	0,655**	0,668**	-0,502**	-0,519**	-0,495**	0,217	0,237	-0,029
	Normal	-0,321*	-0,225	-0,278*	-0,207	-0,166	-0,224	0,683**	0,705**	0,684**		0,936**	0,977**	-0,352**	-0,377**	-0,339**	0,042	0,061	-0,128
12	Overload	-0,383**	-0,298*	-0,292*	-0,220	-0,179	-0,197	0,615**	0,673**	0,655**	0,936**		0,926**	-0,281*	-0,310*	-0,324*	0,001	0,002	-0,081
	Frustration	-0,350**	-0,259	-0,307*	-0,162	-0,116	-0,188	0,645**	0,675**	0,668**	0,977**	0,926**		-0,337*	-0,364**	-0,320*	0,078	0,052	-0,111
	Normal	0,265*	0,228	0,268*	-0,259	-0,262*	-0,228	-0,516**	-0,499**	-0,502**	-0,352**	-0,281*	-0,337*		0,986**	0,970**	0,016	-0,022	0,064
14	Overload	0,269*	0,219	0,258	-0,266*	-0,281*	-0,238	-0,525**	-0,508**	-0,519**	-0,377**	-0,310*	-0,364**	0,986**		0,961**	-0,010	-0,034	0,080
	Frustration	0,339**	0,291*	0,308*	-0,246	-0,249	-0,248	-0,492**	-0,486**	-0,495**	-0,339**	-0,324*	-0,320*	0,970**	0,961**		0,038	0,008	0,007
	Normal	-0,034	-0,018	0,049	0,229	0,262*	0,211	0,163	0,122	0,217	0,042	0,001	0,078	0,016	-0,010	0,038		0,267*	0,422**
30	Overload	0,131	0,162	0,094	-0,105	-0,109	-0,056	0,300*	0,306*	0,237	0,061	0,002	0,052	-0,022	-0,034	0,008	0,267*		0,389**
	Frustration	-0,037	-0,036	-0,069	0,063	0,029	0,093	-0,015	-0,036	-0,029	-0,128	-0,081	-0,111	0,064	0,080	0,007	0,422**	0,389**	

A7: Korrelationsanalyse der Atmungs-Features

Auflistung der berechneten Korrelationen zwischen den Sequenzen der jeweiligen Atmungs-Features. Es sind jeweils die Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind, mit den entsprechenden Sequenzen gegeneinander aufgetragen. Die zugehörigen Werte stellen den Korrelationskoeffizienten (ρ) dar. Grün hinterlegt sind die Werte, die für die Fragestellung dieser Arbeit von Relevanz sind.

*: die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant; **: die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant.

Feature-nummer		59			61			62		
	Sequenz	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration
	Normal		0,818**	0,810**	0,997**	0,828**	0,815**	0,997**	0,823**	0,811**
59	Overload	0,818**		0,740**	0,814**	0,997**	0,743**	0,817**	0,997**	0,742**
	Frustration	0,810**	0,740**		0,811**	0,751**	0,997**	0,811**	0,751**	0,998**
	Normal	0,997**	0,814**	0,811**		0,826**	0,817**	0,999**	0,821**	0,814**
61	Overload	0,828**	0,997**	0,751**	0,826**		0,754**	0,829**	0,998**	0,753**
	Frustration	0,815**	0,743**	0,997**	0,817**	0,754**		0,817**	0,753**	0,998**
	Normal	0,997**	0,817**	0,811**	0,999**	0,829**	0,817**		0,825**	0,813**
62	Overload	0,823**	0,997**	0,751**	0,821**	0,998**	0,753**	0,825**		0,753**
	Frustration	0,811**	0,742**	0,998**	0,814**	0,753**	0,998**	0,813**	0,753**	

A8: Korrelationsanalyse der EDA-Features

Auflistung der berechneten Korrelationen zwischen den Sequenzen der jeweiligen Hautleitwert-Features. Es sind jeweils die Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind, mit den entsprechenden Sequenzen gegeneinander aufgetragen. Die zugehörigen Werte stellen den Korrelationskoeffizienten (ρ) dar. Grün hinterlegt sind die Werte, die für die Fragestellung dieser Arbeit von Relevanz sind. *: die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant; **: die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant.

Feature-nummer		87			95		
	Sequenz	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration
87	Normal		0,931**	0,934**	0,637**	0,522**	0,463**
	Overload	0,931**		0,890**	0,677**	0,573**	0,433**
	Frustration	0,934**	0,890**		0,600**	0,501**	0,499**
95	Normal	0,637**	0,677**	0,600**		0,797**	0,645**
	Overload	0,522**	0,573**	0,501**	0,797**		0,574**
	Frustration	0,463**	0,433**	0,499**	0,645**	0,574**	

A9: Korrelationsanalyse der Temperatur-Features

Auflistung der berechneten Korrelationen zwischen den Sequenzen der jeweiligen Temperatur-Features. Es sind jeweils die Feature-Nummern, wie sie auch in den Tabellen 1 bis 3 zu finden sind, mit den entsprechenden Sequenzen gegeneinander aufgetragen. Die zugehörigen Werte stellen den Korrelationskoeffizienten (ρ) dar. Grün hinterlegt sind die Werte, die für die Fragestellung dieser Arbeit von Relevanz sind.

*: die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant; **: die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant.

Feature-nummer		105			106			107			108			109			111			121			124			130			131			132		
	Sequenz	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration	Normal	Overload	Frustration
105	Normal		0,972**	0,961**	0,747**	0,692**	0,587**	1,000**	0,972**	0,961**	1,000**	0,972**	0,961**	1,000**	0,972**	0,961**	1,000**	0,972**	0,961**	0,603**	0,626**	0,399**	-0,478**	-0,598**	-0,349**	0,886**	0,776**	0,760**	0,626**	0,643**	0,492**	0,747**	0,692**	0,587**
	Overload	0,972**		0,913**	0,710**	0,655**	0,536**	0,973**	1,000**	0,913**	0,973**	1,000**	0,913**	0,973**	1,000**	0,913**	0,973**	1,000**	0,913**	0,552**	0,560**	0,350**	-0,447**	-0,564**	-0,298*	0,849**	0,752**	0,708**	0,578**	0,587**	0,438**	0,710**	0,655**	0,536**
	Frustration	0,961**	0,913**		0,720**	0,655**	0,574**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,602**	0,598**	0,368**	-0,480**	-0,555**	-0,346**	0,861**	0,736**	0,752**	0,618**	0,613**	0,471**	0,720**	0,655**	0,574**
106	Normal	0,747**	0,710**	0,720**		0,887**	0,826**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,878**	0,787**	0,645**	-0,540**	-0,537**	-0,403**	0,928**	0,875**	0,877**	0,941**	0,839**	0,746**	1,000**	0,887**	0,826**
	Overload	0,692**	0,655**	0,655**	0,887**		0,804**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,796**	0,943**	0,663**	-0,598**	-0,713**	-0,487**	0,835**	0,954**	0,833**	0,834**	0,982**	0,736**	0,887**	1,000**	0,804**
	Frustration	0,587**	0,536**	0,574**	0,826**	0,804**		0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,752**	0,752**	0,911**	-0,452**	-0,511**	-0,613**	0,743**	0,770**	0,931**	0,808**	0,788**	0,967**	0,826**	0,804**	1,000**
107	Normal	1,000**	0,973**	0,961**	0,745**	0,690**	0,585**		0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	0,601**	0,624**	0,398**	-0,478**	-0,598**	-0,351**	0,884**	0,774**	0,759**	0,623**	0,641**	0,490**	0,745**	0,690**	0,585**
	Overload	0,972**	1,000**	0,912**	0,709**	0,653**	0,535**	0,973**		0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,552**	0,557**	0,351**	-0,448**	-0,563**	-0,301*	0,848**	0,749**	0,707**	0,578**	0,585**	0,438**	0,709**	0,653**	0,535**
	Frustration	0,961**	0,913**	1,000**	0,720**	0,655**	0,574**	0,961**	0,912**		0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,602**	0,598**	0,368**	-0,480**	-0,555**	-0,346**	0,861**	0,736**	0,752**	0,618**	0,613**	0,471**	0,720**	0,655**	0,574**
108	Normal	1,000**	0,973**	0,961**	0,745**	0,690**	0,585**	1,000**	0,973**	0,961**		0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	0,601**	0,624**	0,398**	-0,478**	-0,598**	-0,351**	0,884**	0,774**	0,759**	0,623**	0,641**	0,490**	0,745**	0,690**	0,585**
	Overload	0,972**	1,000**	0,912**	0,709**	0,653**	0,535**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**		0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,552**	0,557**	0,351**	-0,448**	-0,563**	-0,301*	0,848**	0,749**	0,707**	0,578**	0,585**	0,438**	0,709**	0,653**	0,535**
	Frustration	0,961**	0,913**	1,000**	0,720**	0,655**	0,574**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**		0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,602**	0,598**	0,368**	-0,480**	-0,555**	-0,346**	0,861**	0,736**	0,752**	0,618**	0,613**	0,471**	0,720**	0,655**	0,574**
109	Normal	1,000**	0,973**	0,961**	0,745**	0,690**	0,585**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**		0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	0,601**	0,624**	0,398**	-0,478**	-0,598**	-0,351**	0,884**	0,774**	0,759**	0,623**	0,641**	0,490**	0,745**	0,690**	0,585**
	Overload	0,972**	1,000**	0,912**	0,709**	0,653**	0,535**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**		0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,552**	0,557**	0,351**	-0,448**	-0,563**	-0,301*	0,848**	0,749**	0,707**	0,578**	0,585**	0,438**	0,709**	0,653**	0,535**
	Frustration	0,961**	0,913**	1,000**	0,720**	0,655**	0,574**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**		0,961**	0,912**	1,000**	0,602**	0,598**	0,368**	-0,480**	-0,555**	-0,346**	0,861**	0,736**	0,752**	0,618**	0,613**	0,471**	0,720**	0,655**	0,574**
111	Normal	1,000**	0,973**	0,961**	0,745**	0,690**	0,585**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**	1,000**	0,973**	0,961**		0,973**	0,961**	0,601**	0,624**	0,398**	-0,478**	-0,598**	-0,351**	0,884**	0,774**	0,759**	0,623**	0,641**	0,490**	0,745**	0,690**	0,585**
	Overload	0,972**	1,000**	0,912**	0,709**	0,653**	0,535**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**	1,000**	0,912**	0,973**		0,912**	0,552**	0,557**	0,351**	-0,448**	-0,563**	-0,301*	0,848**	0,749**	0,707**	0,578**	0,585**	0,438**	0,709**	0,653**	0,535**
	Frustration	0,961**	0,913**	1,000**	0,720**	0,655**	0,574**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**	1,000**	0,961**	0,912**		0,602**	0,598**	0,368**	-0,480**	-0,555**	-0,346**	0,861**	0,736**	0,752**	0,618**	0,613**	0,471**	0,720**	0,655**	0,574**
121	Normal	0,603**	0,552**	0,602**	0,878**	0,796**	0,752**	0,601**	0,552**	0,602**	0,601**	0,552**	0,602**	0,601**	0,552**	0,602**	0,601**	0,552**	0,602**		0,780**	0,628**	-0,729**	-0,538**	-0,459**	0,832**	0,755**	0,801**	0,962**	0,801**	0,706**	0,878**	0,796**	0,752**
	Overload	0,626**	0,560**	0,598**	0,787**	0,943**	0,752**	0,624**	0,557**	0,598**	0,624**	0,557**	0,598**	0,624**	0,557**	0,598**	0,624**	0,557**	0,598**	0,780**		0,664**	-0,659**	-0,812**	-0,589**	0,760**	0,899**	0,773**	0,777**	0,980**	0,709**	0,787**	0,943**	0,752**
	Frustration	0,399**	0,350**	0,368**	0,645**	0,663**	0,911**	0,398**	0,351**	0,368**	0,398**	0,351**	0,368**	0,398**	0,351**	0,368**	0,398**	0,351**	0,368**	0,628**	0,664**		-0,441**	-0,492**	-0,756**	0,554**	0,618**	0,810**	0,652**	0,680**	0,973**	0,645**	0,663**	0,911**
124	Normal	-0,478**	-0,447**	-0,480**	-0,540**	-0,598**	-0,452**	-0,478**	-0,448**	-0,480**	-0,478**	-0,448**	-0,480**	-0,478**	-0,448**	-0,480**	-0,478**	-0,448**	-0,480**	-0,729**	-0,659**	-0,441**		0,722**	0,574**	-0,608**	-0,608**	-0,556**	-0,637**	-0,634**	-0,443**	-0,540**	-0,598**	-0,452**
	Overload	-0,598**	-0,564**	-0,555**	-0,537**	-0,713**	-0,511**	-0,598**	-0,563**	-0,555**	-0,598**	-0,563**	-0,555**	-0,598**	-0,563**	-0,555**	-0,598**	-0,563**	-0,555**	-0,538**	-0,812**	-0,492**	0,722**		0,658**	-0,624**	-0,728**	-0,594**	-0,493**	-0,745**	-0,486**	-0,537**	-0,713**	-0,511**
	Frustration	-0,349**	-0,298*	-0,346**	-0,403**	-0,487**	-0,613**	-0,351**	-0,301*	-0,346**	-0,351**	-0,301*	-0,346**	-0,351**	-0,301*	-0,346**	-0,351**	-0,301*	-0,346**	-0,459**	-0,589**	-0,756**	0,574**	0,658**		-0,422**	-0,468**	-0,566**	-0,408**	-0,545**	-0,692**	-0,403**	-0,487**	-0,613**
130	Normal	0,886**	0,849**	0,861**	0,928**	0,835**	0,743**	0,884**	0,848**	0,861**	0,884**	0,848**	0,861**	0,884**	0,848**	0,861**	0,884**	0,848**	0,861**	0,832**	0,760**	0,554**	-0,608**	-0,624**	-0,422**		0,867**	0,872**	0,858**	0,789**	0,654**	0,928**	0,835**	0,743**
	Overload	0,776**	0,752**	0,736**	0,875**	0,954**	0,770**	0,774**	0,749**	0,736**	0,774**	0,749**	0,736**	0,774**	0,749**	0,736**	0,774**	0,749**	0,736**	0,755**	0,899**	0,618**	-0,608**	-0,728**	-0,468**	0,867**		0,848**	0,801**	0,935**	0,690**	0,875**	0,954**	0,770**
	Frustration	0,760**	0,708**	0,752**	0,877**	0,833**	0,931**	0,759**	0,707**	0,752**	0,759**	0,707**	0,752**	0,759**	0,707**	0,752**	0,759**	0,707**	0,752**	0,801**	0,773**	0,810**	-0,556**	-0,594**	-0,566**	0,872**	0,848**		0,840**	0,809**	0,882**	0,877**	0,833**	0,931**
131	Normal	0,626**	0,578**	0,618**	0,941**	0,834**	0,808**	0,623**	0,578**	0,618**	0,623**	0,578**	0,618**	0,623**	0,578**	0,618**	0,623**	0,578**	0,618**	0,962**	0,777**	0,652**	-0,637**	-0,493**	-0,408**	0,858**	0,801**	0,840**		0,819**	0,748**	0,941**	0,834**	0,808**
	Overload	0,643**	0,587**	0,613**	0,839**	0,982**	0,788**	0,641**	0,585**	0,613**	0,641**	0,585**	0,613**	0,641**	0,585**	0,613**	0,641**	0,585**	0,613**	0,801**	0,980**	0,680**	-0,634**	-0,745**	-0,545**	0,789**	0,935**	0,809**	0,819**		0,738**	0,839**	0,982**	0,788**
	Frustration	0,492**	0,438**	0,471**	0,746**	0,736**	0,967**	0,490**	0,438**	0,471**	0,490**	0,438**	0,471**	0,490**	0,438**	0,471**	0,490**	0,438**	0,471**	0,706**	0,709**	0,973**	-0,443**	-0,486**	-0,692**	0,654**	0,690**	0,882**	0,748**	0,738**		0,746**	0,736**	0,967**
132	Normal	0,747**	0,710**	0,720**	1,000**	0,887**	0,826**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,745**	0,709**	0,720**	0,878**	0,787**	0,645**	-0,540**	-0,537**	-0,403**	0,928**	0,875**	0,877**	0,941**	0,839**	0,746**		0,887**	0,826**
	Overload	0,692**	0,655**	0,655**	0,887**	1,000**	0,804**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,690**	0,653**	0,655**	0,796**	0,943**	0,663**	-0,598**	-0,713**	-0,487**	0,835**	0,954**	0,833**	0,834**	0,982**	0,736**	0,887**		0,804**
	Frustration	0,587**	0,536**	0,574**	0,826**	0,804**	1,000**	0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,585**	0,535**	0,574**	0,752**	0,752**	0,911**	-0,452**	-0,511**	-0,613**	0,743**	0,770**	0,931**	0,808**	0,788**	0,967**	0,826**	0,804**	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Circumplexmodell 6
Abbildung 2: ecgFEAT Toolbox 21
Abbildung 3: Kubios HRV Standard Toolbox 22
Abbildung 4: EKG-Merkmale 23
Abbildung 5: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EKG 32
Abbildung 6: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals Atmung 33
Abbildung 7: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EDA 34
Abbildung 8: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals Temperatur 35
Abbildung 9: Prozentuale Unterschiede der Sequenzmittelwerte des Biosignals EMG 36
Abbildung 10: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal EKG 39
Abbildung 11: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal Atmung 41
Abbildung 12: Signifikante Ergebnisse des Friedman-Tests zu dem Biosignal EDA 43
Abbildung 13: Signifikante Ergebnisse des Friedman Tests zu dem Biosignal Temperatur 46
Abbildung 14: ANOVA-Effektstärken signifikanter Features 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategoriebasierte Features Teil 1.....25
Tabelle 2: Kategoriebasierte Features Teil 2.....26
Tabelle 3: Kategoriebasierte Features Teil 3.....27
Tabelle 4: Signalbasierte Features Teil 1.....27
Tabelle 5: Signalbasierte Features Teil 2.....28
Tabelle 6: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EKG Teil 1.....37
Tabelle 7: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EKG Teil 2.....38
Tabelle 8: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Atmung.....40
Tabelle 9: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EDA.....42
Tabelle 10: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Temperatur Teil 1.....44
Tabelle 11: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal Temperatur Teil 2.....45
Tabelle 12: Ergebnisse der Friedmann-Tests zum Biosignal EMG.....46
Tabelle 13: signifikante Sequenzunterschiede.....57

Danksagung

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.