

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Einfluss der (subjektiv empfundenen) mentalen Ermüdung auf GPS-Tracking-
Parameter im Herrenfußball

verfasst von | submitted by

David Poppenberger BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 199 500 511 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Bewegung und Sport Unterrichtsfach Geschichte und
Politische Bildung

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Arnold Baca

Abstract

Mentale Ermüdung (ME) gilt im Fußball als wesentlicher Einflussfaktor auf Konzentration, Entscheidungsqualität und technische Ausführung. Obwohl ihre Bedeutung gut dokumentiert ist, bleibt offen, ob ME durch objektive GPS-Daten im Trainingsalltag abbildbar ist.

Die Studie untersuchte, ob zwischen subjektiv berichteter mentaler Ermüdung und den Parametern Beschleunigung, Player Load und gelaufener Distanz ein Zusammenhang festgestellt werden kann.

20 Regionalligaspieler wurden über mehrere Trainingseinheiten begleitet. Vor jeder Einheit bewerteten sie ihre mentale Ermüdung per NRS-Skala. Gleichzeitig wurden GNSS-Daten erfasst, die Beschleunigungszonen, Player Load und Distanz pro Minute abbildeten. Die Ermüdungswerte wurden in vier Kategorien gruppiert und anschließend mittels linearer Modelle analysiert.

Die Distanz pro Minute zeigte keinen Zusammenhang mit mentaler Ermüdung. Dagegen erwiesen sich sowohl die Beschleunigungszone 5 als auch der Player Load als signifikante Prädiktoren. Überraschend war der inverse Zusammenhang zwischen Player Load und ME: Spieler mit höherem Player Load berichteten geringere mentale Ermüdung. Dies legt nahe, dass mental frische Spieler komplexere Bewegungsmuster und häufigere dynamische Aktionen ausführen, während mental ermüdete Spieler ihr Bewegungsverhalten vereinfachen und reduzieren.

Distanzbasierte Kennzahlen eignen sich nicht zur Abbildung mentaler Ermüdung. Dynamische Bewegungsparameter wie Beschleunigungen und Player Load weisen hingegen eine erhöhte Sensitivität gegenüber mentalen Zuständen auf. Die Ergebnisse unterstützen ein multimodales Monitoring, das subjektive Ratings und objektive Belastungsdaten kombiniert. Weiterführende Forschung sollte größere Stichproben und zusätzliche objektive Messmethoden einbeziehen.

Mental fatigue (MF) is known to impair concentration, decision-making and technical execution in football. Despite its relevance, it remains unclear whether MF can be objectively detected using GPS-derived training data.

The study investigated whether a relationship could be identified between subjectively reported mental fatigue and the parameters acceleration, player load, and total distance covered. Twenty semi-professional players were monitored across several training sessions. Before each session, players rated their MF level using an NRS scale. Simultaneously, GNSS devices recorded acceleration zones, Player Load and distance per minute. MF scores were categorized into four levels and analysed using linear models.

Distance per minute showed no association with MF. In contrast, both acceleration zone 5 and Player Load significantly predicted MF levels. Notably, Player Load was inversely related to MF, indicating that mentally fresh players display more dynamic, multidirectional movement patterns, while mentally fatigued players tend to reduce movement variability and intensity.

Distance metrics alone are insufficient for monitoring mental fatigue. In contrast, dynamic locomotor indicators—particularly specific acceleration zones and Player Load—appear more sensitive to variations in mental readiness. The findings highlight the importance of integrating subjective and objective monitoring tools in daily training. Future research should employ larger samples and multimodal assessment strategies.

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	1
2	EINLEITUNG	3
3	MESSMETHODEN UND -SYSTEME	7
3.1	MESSMETHODEN	8
3.1.1	Subjektive Messmethoden	8
3.1.2	Subjektive Einschätzung von Anstrengung	9
3.1.3	RPE/RIR.....	9
3.1.4	Likert-Skala	9
3.1.5	Numerische Ratingskala (NRS).....	10
3.1.6	Verbale Ratingskala (VRS)	10
3.1.7	Visuelle Analogskala (VAS)	10
3.2	OBJEKTIVE MESSMETHODEN	10
3.2.1	Kognitive Leistungstests	11
3.2.2	Stroop-Test	11
3.2.3	Go/No-Go-Test.....	11
3.2.4	EEG-Messung zur Erkennung mentaler Ermüdung.....	11
3.2.5	Eye-Tracking und okulometrische Parameter	12
3.2.6	Herzfrequenzvariabilität (HRV) im Kontext mentaler Ermüdung.....	12
3.3	ERFASSUNG DER LOKOMOTORISCHEN DATEN	13
3.3.1	Systeme basierend auf GNSS (Global Navigation Satellite System).....	13
3.3.2	Systeme basierend auf LPS (Local Positioning Systems)	13
3.3.3	Systeme basierend auf Optical Tracking	13
3.3.4	Smartphonebasierte Tracking-Systeme im Fußball.....	13
3.4	VERGLEICH DER SYSTEME.....	14
3.4.1	Anwendungsbereich	14
3.4.2	Genauigkeit und Fehleranfälligkeit.....	14
3.4.3	Intrusivität.....	14
3.4.4	Objektive Messung der Herzfrequenz	15
3.4.5	Kombinationssysteme	15
3.5	FINALES FORSCHUNGSDESIGN	16
4	FORSCHUNGSSTAND.....	17
4.1	DEFINITION UND ERFASSUNG MENTALER ERMÜDUNG.....	17
4.2	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN INTELLIGENZ UND MENTALER ERMÜDUNG	18
4.3	SUBJEKTIVE ERFASSUNGSMETHODEN	19
4.4	OBJEKTIVE ERFASSUNGSMETHODEN	20
4.5	NEUROPHYSIOLOGISCHE UND NEUROCHEMISCHE MECHANISMEN MENTALER ERMÜDUNG.....	21
4.6	AUSWIRKUNGEN MENTALER ERMÜDUNG	23
4.7	LEISTUNGS AUSWIRKUNGEN – INDIVIDUELL	24
4.7.1	Einfluss mentaler Ermüdung auf das Herz-Kreislauf-System.....	24
4.7.2	Emotionsregulierung	25
4.7.3	Passtechnik.....	26
4.7.4	Dribbling	26
4.7.5	Zweikampfverhalten	27
4.7.6	Verringerung der zurückgelegten Gesamtstrecke	28
4.7.7	Verringerung der Strecke mit hoher Geschwindigkeit	28
4.7.8	Sprung	29
4.8	LEISTUNGS AUSWIRKUNGEN - KOLLEKTIV	30
4.8.1	Veränderungen pro Position	30
4.8.2	Veränderungen in der Formation	31
4.8.3	Veränderung der Leistung in Bezug auf den Gegner	31
4.8.4	Veränderung des Spielstils.....	32
4.9	ZEITLICHE DYNAMIK	33

4.9.1	Auswirkungen auf die Trainingswoche	33
4.9.2	Auswirkungen der Spielzeit	33
4.10	MONITORING	34
4.10.1	GNSS (Global Navigation Satellite System)	34
4.11	DEFINITION DER BESCHLEUNIGUNGSZONEN	35
4.12	PLAYER LOAD	36
4.13	MÖGLICHKEITEN ME VORZUBEUGEN	37
4.13.1	Trainierbarkeit der mentalen Belastungstoleranz	37
5	METHODIK	38
5.1	STICHPROBE	38
5.2	STUDIENDESIGN UND ABLAUF	39
5.3	DATENERHEBUNG	40
5.4	DATENAUFBEREITUNG	40
5.5	STATISTISCHE AUSWERTUNG	41
6	ERGEBNISSE	42
6.1	DESKRIPTIVE STATISTIK	42
6.1.1	Beschleunigungszonen	42
6.1.2	Player Load und Gelaufene Meter	44
6.1.3	Ermüdung	45
6.2	STATISTISCHE TESTUNG	46
6.2.1	Beschleunigungsparameter und mentale Ermüdung	46
6.2.1.1	Tests auf Normalverteilung	46
6.2.1.2	Korrelationen	47
6.2.1.3	Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Beschleunigungszonen)	47
6.2.1.4	Anpassungsgüte	48
6.2.1.5	Pseudo R-Quadrat	48
6.2.1.6	Parallelitätstest für Linien ^a	49
6.2.2	Player Load	50
6.2.2.1	Tests auf Normalverteilung	50
6.2.2.2	Korrelationen	51
6.2.2.3	Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Player Load)	52
6.2.2.4	Anpassungsgüte und Pseudo R-Quadrat	52
6.2.2.5	Parameterschätzer	53
6.2.2.6	Parallelitätstest für Linien ^a	54
6.2.3	Gelaufene Meter (pro Minute)	54
6.2.3.1	Tests auf Normalverteilung	54
6.2.3.2	Korrelationen	56
6.2.3.3	Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Gelaufene Meter)	57
6.2.3.4	Anpassungsgüte und Pseudo R-Quadrat	57
6.2.3.5	Parameterschätzer und Parallelitätstest für Linien ^a	58
7	DISKUSSION UND CONCLUSIO	59
8	LITERATURVERZEICHNIS	67
9	HILFSMITTELVERZEICHNIS	80
10	ABKÜRZUNGEN	80
11	ERKLÄRUNG	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Session	43
Abbildung 2 - Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Ermüdungskategorien	43
Abbildung 3 - Deskriptive Statistik Player Load	44
Abbildung 4 - Deskriptive Statistik Gelaufene Meter	45
Abbildung 5 - Deskriptive Statistik Ermüdung	45
Abbildung 6 - Histogramm Player Load	51
Abbildung 8 - Histogramm Gelaufene Meter	55
Abbildung 9 - Q-Q-Diagramm Gelaufene Meter	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Deskriptive Statistik Beschleunigungszonen.....	42
Tabelle 2 - Deskriptive Statistik Player Load und Gelaufene Meter	44
Tabelle 3 - Deskriptive Statistik Ermüdung.....	45
Tabelle 4 - Test auf Normalverteilung Beschleunigungszonen	46
Tabelle 5 - Korrelationen Ermüdung Beschleunigungszonen	47
Tabelle 6 - Modellanpassung Beschleunigungszonen	48
Tabelle 7 - Anpassungsgüte Beschleunigungszonen.....	48
Tabelle 8 - Pseudo R-Quadrat Beschleunigungszonen	49
Tabelle 9 - Parallelitätstest für Linien Beschleunigungszonen	49
Tabelle 10 - Test auf Normalverteilung Player Load.....	50
Tabelle 11 - Korrelationen Ermüdung Player Load	52
Tabelle 12 - Modellanpassung Player Load	52
Tabelle 13 - Anpassungsgüte Player Load.....	53
Tabelle 14 - Pseudo R-Quadrat Player Load	53
Tabelle 15 - Parameterschätzer Player Load.....	53
Tabelle 16 - Parallelitätstest für Linien Player Load	54
Tabelle 17 - Test auf Normalverteilung Gelaufene Meter	55
Tabelle 18 - Korrelationen Ermüdung Gelaufene Meter	56
Tabelle 19 - Modellanpassung Gelaufene Meter.....	57
Tabelle 20 - Anpassungsgüte Gelaufene Meter	57
Tabelle 21 - Pseudo R-Quadrat Gelaufene Meter.....	58
Tabelle 22 - Parameterschätzer Gelaufene Meter	58
Tabelle 23 - Parallelitätstest für Linien Gelaufene Meter	59

1 Vorwort

Das Thema der vorliegenden Masterarbeit begleitet mich bereits über einen längeren Zeitraum, da ich mich schon im Rahmen meiner Bachelorarbeit mit der mentalen Ermüdung im Fußball auseinandergesetzt habe. Die weiterführende Beschäftigung mit diesem Forschungsfeld stellte für mich jedoch weit mehr dar als eine reine akademische Vertiefung. Vielmehr entwickelte sich die Arbeit zu einem kontinuierlichen Erkenntnisprozess, der mir die Komplexität und Relevanz mentaler Belastungsfaktoren im leistungsorientierten Fußball zunehmend verdeutlichte.

Das Interesse an diesem Thema ist insbesondere aus der Verbindung meines Lehramt Sport-Studiums mit meiner praktischen Tätigkeit als Fußballtrainer entstanden. Während meines Studiums erhielt ich Einblicke in unterschiedliche Teilbereiche der Sportwissenschaft, die mir ein interdisziplinäres Verständnis sportlicher Leistungsfähigkeit ermöglichten. Parallel dazu bot mir die Trainertätigkeit die Möglichkeit, theoretische Konzepte unmittelbar in der Praxis zu reflektieren. Die kontinuierliche Auseinandersetzung mit neuen Impulsen aus Vorlesungen, Seminaren, wissenschaftlicher Literatur sowie Trainerfortbildungen führte letztlich zur vertieften Fokussierung auf die mentale Ermüdung als zentralen Einflussfaktor der sportlichen Leistungsfähigkeit.

Auch wenn die vorliegende Arbeit das Ergebnis eigenständiger Forschung ist, wäre ihre Umsetzung ohne die Unterstützung zahlreicher Personen nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Universitätsprofessor Dipl.-Ing. Dr. Arnold Baca, für seine fachliche Expertise, seine konstruktiven Anregungen und seine kontinuierliche Begleitung während des gesamten Forschungsprozesses. Ebenso möchte ich meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden für ihre anhaltende Unterstützung, ihr Verständnis und ihre Motivation danken, die mich während der gesamten Dauer der Masterarbeit begleitet haben.

Abschließend hoffe ich, dass diese Arbeit nicht nur einen Beitrag zur sportwissenschaftlichen Forschung im Bereich der mentalen Ermüdung leistet, sondern auch andere Studierende dazu ermutigt, sich intensiv mit wissenschaftlichen Fragestellungen auseinanderzusetzen.

Der Fußball und insbesondere die Trainings- und Belastungssteuerung bieten ein breites Feld offener Fragen und Entwicklungsmöglichkeiten. Ich bin dankbar für die Gelegenheit, im Rahmen dieser Arbeit einen eigenen Beitrag zu diesem dynamischen Forschungs- und Praxisfeld leisten zu dürfen.

2 Einleitung

Das moderne körperliche Training im Spitzensport beruht auf der systematischen und kontinuierlichen Auswertung von Daten zu Wettkampf- und Trainingsleistungen (Clemente et al., 2019a). Eine gängige Methode im Mannschaftssport ist das Sammeln von Daten mittels GPS Tracking (Global Positioning System). Es zählt zu den am häufigsten eingesetzten Überwachungstools zur Erfassung der Arbeitsbelastung während des Trainings und bei Wettkämpfen (Akenhead & Nassis, 2016). Die aus diesen Daten abgeleitete Trainingslast (TL) kann in externe und interne Lasten unterschieden werden (Jaspers et al., 2017). Während sich die externe TL auf die Gesamtaktivitäten der Spieler:innen bezieht, umfasst die interne TL die innere Beanspruchung, also die Verbindung von psychischer und physischer Belastung (Jaspers et al., 2017). Während vor allem im 20. Jahrhundert alles dafür getan wurde, die Belastung zu optimieren, hat sich in den letzten zehn Jahren ein Trend zu einer stärkeren Betonung der Erholung entwickelt (Meyer et al., 2016). Die seit 2006 im professionellen Sport weit verbreitete Methode des Datensammelns mittels GPS Tracking ist ein Mittel, um herauszufinden, welche Leistungen die Athlet:innen auf dem Feld erbringen (Akenhead & Nassis, 2016).

Als zentraler Faktor gilt in der modernen Sportwissenschaft mentale Ermüdung, welche einerseits die kognitive und andererseits die physische Leistungsfähigkeit von Athlet:innen beeinflusst. Auch in der Sportart Fußball, wo bislang eher physiologische Belastungsparameter für die Steuerung des Trainings herangezogen wurden (Thomson, 2020), erhalten mentale Einflussfaktoren zunehmend Aufmerksamkeit (Smith et al., 2018; Thomson, 2020). Wie in der bisherigen Forschung bereits gezeigt wurde, beeinflusst mentale Ermüdung u. a. die Entscheidungsfindung (Smith et al., 2016) sowie die technische und taktische Leistung der Athlet:innen, z. B. einen Anstieg der Fehlpässe (Coutinho et al., 2018), und nicht zuletzt die Emotionsregulation (Grillon et al., 2015).

Weiterer Forschungsbedarf besteht jedoch vor allem in der Prävention und Verminderung mentaler Ermüdung, um ideale Bedingungen für taktische Inhalte zu garantieren und an Matchtagen die optimale kognitive Leistung abrufen zu können. Prominente Beispiele aus dem Bereich Fußball beleuchten die verschiedenen Einflussfaktoren der mentalen Ermüdung und deren Auswirkungen auf die Profis. Sie untermauern nicht nur die Existenz dieses Problems, sondern zeigen auch, dass sich die Sportler:innen eine Veränderung im Umgang mit der Thematik wünschen.

Zum Thema „Druck“ sprach der ehemalige Arsenal Profi Per Mertesacker 2018 in einem Spiegel Interview. Er beschrieb sowohl die Nervosität und die körperlichen Erscheinungen vor Spielen als auch das erleichternde Gefühl nach dem Ausscheiden bei der Heim EM in Deutschland 2006 (Spiegel, 2018).

Auch der ehemalige Spieler des FC Bayern München sowie spätere Trainer, Markus Babbel, äußerte sich zu einer Situation im Champions League Finale 1999. So beschrieb er eine Szene kurz vor Ende des Spiels folgendermaßen: „Ich war froh, als Manchester United das 2:1 geschossen hat. Beim 1:1 in der Nachspielzeit dachte ich: Oh, nein! Und jetzt noch Verlängerung! Ich kann nicht mehr! Das 1:2 nur Sekunden später war fast befreiend.“ (kicker.de).

Zur mentalen Gesundheit sowie zum Umgang mit öffentlicher Kritik äußerten sich Trainer wie Wanchope Watson, der im Rahmen der ReachOut Kampagne der FIFA zur psychischen Gesundheit von Profifußballer:innen Stellung nahm (Inside FIFA). Der ehemalige Trainer des FC Bayern München, Niko Kovač, sprach über die Belastungen durch den Erfolgsdruck sowie das stets in der Öffentlichkeit ausgetragene Urteil zu den jeweiligen Leistungen des Spieltags. Diesbezüglich verwies er auch auf die Notwendigkeit „seelischen Friedens“ und betonte, dass mentale Belastungen die Leistungsfähigkeit beeinflussen können (welt.de). Den aus der öffentlichen Meinung entstehenden Druck kritisierte auch die ehemalige Bundestrainerin der deutschen Frauen Nationalmannschaft, Martina Voss Tecklenburg, die den Online Druck nach schlechteren Leistungen anprangerte. Sie unterstrich, dass die Kommentare nur zu noch mehr mentalem Druck und demnach auch weiteren schlechteren Leistungen führen werden (bild.de).

Die neueste Debatte im Profifußball umfasst verschiedene Reformen und Zukunftsvisionen der internationalen Fußballorganisationen. Die Kommerzialisierung des Sports soll dazu führen, dass es mehr Spiele in einer Saison gibt, bei denen man seine Idole bewundern kann. Zu dieser Thematik haben allerdings einige namhafte Spieler:innen und Trainer:innen eine klare Haltung. Manchester City Spieler Rodri ging mit folgender Aussage an die Öffentlichkeit: „Wir sind kurz davor, in den Streik zu treten.“ Mit diesen Worten begrüßte Rodri im September 2024 das neue Format der Champions League: „Wenn es so weitergeht, haben wir keine andere Wahl. [...] Wir sind die Hauptdarsteller in diesem Sport – oder Geschäft. Nicht alles ist Geld und Marketing, es geht auch um die Qualität des Spektakels. Wenn die Leute guten Fußball sehen wollen, benötigen wir Erholung.“ (welt.de).

Auch FC Bayern Trainer Vincent Kompany äußerte sich auf einer Pressekonferenz zur aktuellen Diskussion um die vielen Spiele im Profifußball und die damit verbundene Belastung für die Spieler:innen: „Das war schon immer ein Thema in den vergangenen Jahren, ich war Teil der FIFPRO Spielergewerkschaft. Da geht es nicht nur um die Spiele, sondern auch um die Reisen – auch mit dem Nationalteam. Da geht es um 75, 80 Spiele. Ich habe schon als Spieler gefordert, dass man eine Maximalanzahl bestimmt, die ein Spieler absolvieren darf, man sollte das begrenzen. Damit schützt man seine Gesundheit

und die Interessen der Klubs. Und am Ende auch die Trainer, für die ist es auch nicht einfach. Das wäre sehr sinnvoll.“ (welt.de).

Zuletzt meldete sich auch der nunmehr ehemalige Trainer von Borussia Dortmund, Nuri Şahin, zu Wort: „Ich habe das Gefühl: Je mehr wir darüber reden, desto mehr Spiele werden es. Ich verfolge seit Jahren jede Pressekonferenz von den Toptrainern – Pep, Jürgen – die beklagen sich seit Jahren. Und nichts ändert sich. Wenn die Spieler schon vom Streik reden, dann müsste es eigentlich Klick machen bei jedem Einzelnen. Wenn sich die Organisation keine Gedanken macht, müssen wir das tun. Es ist unsere Pflicht als Verein, dafür zu sorgen, dass die Spieler nicht übersäuern und mental überlastet werden.“ (welt.de).

Dass man in der absoluten Spitze des Fußballs stets auf der Suche nach Optimierung ist und dabei nicht auf die mentale Komponente vergisst, zeigt der fünfmalige Champions League Sieger Carlo Ancelotti. Dieser engagierte die Firma „Minute9“, um seine Halbzeitanreden zu optimieren, da diese laut Eamon Devlin, dem Gründer der Firma, ab einer gewissen Länge ihre Wirksamkeit aufgrund der mentalen Vorbelastung der Spieler verlieren (SkySports.com). Die objektive Erfassung von Indikatoren mentaler Ermüdung ist somit eines der wichtigsten Forschungsziele im Hinblick auf die Trainingsplanung im Profisport (Kölling et al., 2019).

Jedoch konnten bis dato nur wenige Erkenntnisse über die Messbarkeit mentaler Ermüdung in Bezug auf die durch GPS generierten Werte zur Beschleunigung bzw. Laufintensität der Spieler:innen gesammelt werden – eine Forschungslücke, die für Sportwissenschaftler:innen aus den Ballsportarten von großer Bedeutung ist. Die objektive Erfassung mentaler Ermüdung könnte zu einer Optimierung der Trainingssteuerung führen sowie Leistungsschwankungen, Überlastung und Verletzungen entgegenwirken.

Unter mentaler Ermüdung versteht man einen psychobiologischen Zustand, der durch anspruchsvolle kognitive Aktivitäten hervorgerufen wird und sich hinderlich auf die geistige Leistungsfähigkeit auswirkt (Boksem et al., 2005; Pageaux et al., 2014). Sie wird als mit der Zeit zunehmend verstanden und äußert sich objektiv in der Abnahme der Leistung sowie subjektiv durch anwachsenden Widerstand gegen fortlaufende Anstrengungen, Müdigkeitsgefühl, Energiemangel und Stimmungsschwankungen (Habay et al., 2021; Lam et al., 2021; van Cutsem et al., 2017; Marcora et al., 2009; Meijman, 2000). Folglich beschreiben Lam et al. (2023) mentale Ermüdung als Unfähigkeit, die Konzentration aufrechtzuerhalten und Informationen für die Entscheidungsfindung nach längerer kognitiver Belastung effizient und effektiv zu verarbeiten. Der mentale Ermüdungszustand und die damit einhergehenden Veränderungen der Gehirnaktivität sowie diverser kognitiver Aktivitäten sind Auswirkungen des Trainings auf physiologischer Ebene (Brownsberger et

al., 2013; Wascher et al., 2014). Durch ebendiese Veränderungen nimmt der Athlet v. a. die Anstrengungen anders wahr (van Cutsem et al., 2017).

Die Charakteristika, mit denen dieser Ermüdungszustand belegt werden kann, sind spezifische physiologische bzw. kardiovaskuläre Parameter wie Herzfrequenz, Blutdruck, Blutlaktat, maximale Sauerstoffaufnahme und Herzminutenvolumen (Brownsberger et al., 2013; Marcora et al., 2009). Was bislang aber noch nicht nachgewiesen werden konnte, ist die kardiovaskuläre, respiratorische und metabolische Reaktion auf eine körperliche Belastung in einem mental ermüdeten Zustand (Marcora et al., 2009; van Cutsem et al., 2017). Vermutet wird, dass u. a. Neurotransmitter, die durch mentale Ermüdung negativ beeinflusst werden, die Ausdauerleistung beeinträchtigen (van Cutsem et al., 2017). Eine der wichtigsten Fragen bleibt daher, ob einer dieser Parameter einen mentalen Ermüdungszustand beschreiben kann oder ob mentale Ermüdung eher aufgrund eines physiologischen Ermüdungszustandes entsteht. Insbesondere im Leistungssport scheint die physiologische Anforderung ein wesentlicher Bestandteil der mentalen Ermüdung zu sein (Knicker et al., 2011; Nédélec et al., 2012).

Ziel dieser Arbeit ist es, einerseits die Entstehung mentaler Ermüdung sowie die Auswirkungen dieser auf die Leistungsfähigkeit zu skizzieren. Andererseits soll herausgefunden werden, ob anhand objektiver Erhebungsinstrumente mentale Ermüdung festgestellt werden kann. Dies soll durch Erhebung der GPS Daten mit speziellem Fokus auf die Beschleunigungsparameter gelingen. Die Literatur zeigt, dass mentale Ermüdung ein wesentlicher Faktor zum Verständnis der Erholungsphase der Spieler:innen sein kann, da sie sich auf diverse Faktoren der Leistungsfähigkeit auswirkt (Diego et al., 2017).

Ein besseres Verständnis sowie der Umgang mit diesen Informationen führen dazu, dass sowohl die Leistungsfähigkeit der einzelnen Spieler:innen als auch die des Teams verbessert werden und Verletzungen sowie „schlechte“ Leistungen verhindert bzw. nachvollziehbar gemacht werden können (Hostrup et al., 2022).

Um die Auswirkungen mentaler Ermüdung auf die Leistungsfähigkeit im Fußball zu untersuchen, wurde ein quantitativer Ansatz gewählt, der es ermöglicht, präzise und vergleichbare Daten zu erheben. Die im Folgenden beschriebenen Methoden sollen dazu dienen, die mentalen und physischen Belastungsfaktoren unter realitätsnahen Bedingungen zu messen und deren Zusammenhänge systematisch zu analysieren.

3 Messmethoden und -systeme

Das folgende Kapitel beschreibt das methodische Fundament dieser Arbeit und legt dar, aus welchen Gründen ein quantitativer Forschungsansatz gewählt wurde. Ziel der Untersuchung ist es, die Leistungsfähigkeit von Fußballspieler:innen im Kontext mentaler Ermüdung auf objektive Weise zu erfassen und auszuwerten. Im Zentrum steht die Frage, inwieweit sich kognitive Belastung auf physische Parameter während sportlicher Belastungseinheiten auswirkt.

Um dieser Fragestellung adäquat zu begegnen, wurde ein quantitativer Zugang gewählt. Dieser ermöglicht es, präzise und vergleichbare Daten zu erheben, die einer systematischen statistischen Analyse unterzogen werden können. Der Vorteil quantitativer Methoden liegt in der Standardisierung des Untersuchungsdesigns, der Nachvollziehbarkeit der Datenerhebung sowie der Möglichkeit, objektive Aussagen über Zusammenhänge oder Unterschiede innerhalb der erhobenen Datenbasis zu treffen (Kelle, 2018; Bänsch, 2013). Insbesondere im sportwissenschaftlichen Kontext – und hier explizit im Fußball – hat sich der Einsatz quantitativer Verfahren zur Erfassung leistungsrelevanter Parameter etabliert. Studien wie jene von Garrett et al. (2021) oder Beato et al. (2019) zeigen, dass beispielsweise mittels GPS-Daten sowie wiederholter Belastungstests valide Aussagen über physische Einbußen im Zusammenhang mit Ermüdungserscheinungen getroffen werden können. Die genannten Untersuchungen verdeutlichen, dass quantitative Methoden nicht nur praktikabel, sondern auch aussagekräftig sind, wenn es darum geht, Veränderungen der Leistungsfähigkeit unter realitätsnahen Bedingungen zu erfassen.

Das Untersuchungsdesign dieser Arbeit wurde speziell entwickelt, um die Auswirkungen mentaler Ermüdung auf die körperliche Leistungsfähigkeit unter realistischen Trainingsbedingungen zu untersuchen. Standardisierte Protokolle kamen zum Einsatz, um die Qualität und Vergleichbarkeit der erfassten Daten sicherzustellen. Vor jeder Messung wurden die Spieler auf einer Skala von 1 bis 10 zu ihrem aktuellen mentalen Ermüdungszustand befragt, um später die Ergebnisse einordnen und vergleichen zu können. Die Tests wurden durch den Versuchsleiter, sowie das Trainerteam des Regionalligavereins TWL Elektra durchgeführt, wobei GPS-Tracker von QUS eingesetzt wurden, um valide und zuverlässige Daten zu erheben.

Zur Auswertung der erhobenen Daten wurden zunächst deskriptive Statistiken berechnet, um die Stichprobe und die zentralen Variablen zu beschreiben. Anschließend erfolgte die Prüfung der Verteilungsannahmen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnov-Tests sowie durch eine grafische Inspektion der Residuen (Histogramm, Q-Q-Plot).

Zur Analyse der Zusammenhänge zwischen mentaler Ermüdung und den leistungsbezogenen Parametern (Beschleunigungszonen, Player Load, gelaufene Meter) wurden Pearson-Korrelationen und lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Dabei wurden Modellgüte (R^2 , korrigiertes R^2), Signifikanzniveau ($p < .05$) sowie die Durbin-Watson-Statistik zur Überprüfung der Unabhängigkeit der Residuen berücksichtigt. Alle Berechnungen erfolgten mit einer festgelegten Signifikanzschwelle von $\alpha = 0.05$. Die gewählte Herangehensweise trägt zur evidenzbasierten Untersuchung der mentalen Ermüdung im Fußball bei, indem sie eine transparente und nachvollziehbare Darstellung des methodischen Vorgehens bietet. Dies gewährleistet nicht nur eine fundierte Einordnung der Ergebnisse im sportwissenschaftlichen Diskurs, sondern auch die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse praxisnah zu nutzen (Bös et al., 2004).

Nachdem das Untersuchungsdesign erläutert wurde, folgt nun eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Messmethoden. Diese Methoden wurden sorgfältig ausgewählt, um sowohl die subjektive Wahrnehmung der mentalen Ermüdung durch die Athleten als auch deren objektive physiologische Reaktionen während des Trainings und Spiels präzise zu erfassen. Dabei kommen sowohl etablierte psychometrische Instrumente als auch fortschrittliche GPS-Tracking-Technologien zum Einsatz, die es ermöglichen, die komplexen physiologischen und psychologischen Faktoren der mentalen Ermüdung in einem realitätsnahen Kontext zu messen.

3.1 Messmethoden

In den nachstehenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevanten Messmethoden dargestellt. Dabei erfolgt zunächst eine Übersicht über subjektive und objektive Verfahren, bevor erläutert wird, welche dieser Ansätze im Rahmen der Untersuchung eingesetzt wurden.

3.1.1 Subjektive Messmethoden

Um die mentale Ermüdung der Probanden im Vorfeld zu erfassen, wurden verschiedene in der Literatur beschriebene und etablierte Verfahren herangezogen. Dazu zählen insbesondere subjektive Einschätzungen durch Fragebögen und Skalen, aber auch Methoden aus der Leistungsdiagnostik, die Hinweise auf kognitive Ermüdungszustände liefern.

Bei der Auswahl geeigneter Instrumente wurden Aspekte wie Praxistauglichkeit im Trainingsalltag, wissenschaftliche Validität und Anschlussfähigkeit an bestehende Studien aus dem Bereich der Sportpsychologie berücksichtigt (Bös et al., 2004; Singer & Willimczik, 2002; Klewer, 2002).

3.1.2 Subjektive Einschätzung von Anstrengung

Borg-Skala (6–20). Die Borg-Skala dient der Erfassung der subjektiv wahrgenommenen körperlichen Belastung. Sie ist ein weit verbreitetes und valides Instrument, das v. a. im Ausdauertraining eingesetzt wird. Die Skala reicht von 6 bis 20 und ermöglicht eine einfache Einordnung der empfundenen Anstrengung: Niedrige Werte stehen für eine geringe, hohe Werte für eine starke Belastung. Die Zahlen sind so gewählt, dass eine Multiplikation mit zehn näherungsweise der Herzfrequenz entspricht (Borg, 1998).

3.1.3 RPE/RIR

Auch die RPE- (Rating of Perceived Exertion) und RIR- (Repetitions in Reserve) Skalen sind numerische Systeme zur Einschätzung der subjektiven Anstrengung. Die RIR-Skala bezieht sich insbesondere auf die Anzahl möglicher Wiederholungen, die bei konstanter Belastung noch möglich wären. Beide Skalen setzen ein gewisses Selbstverständnis für die eigene Leistungsfähigkeit voraus und sind besonders im Krafttraining üblich (Scherr et al., 2012; Gjestvang et al., 2024; LiaBraaten et al., 2023; Jiang et al., 2022).

3.1.4 Likert-Skala

Die Likert-Skala ist ein standardisiertes Verfahren zur Erfassung subjektiver Einschätzungen. Die Befragten geben an, inwieweit sie einem bestimmten Statement zustimmen oder es ablehnen. Meist bestehen diese Skalen aus fünf bis elf Abstufungen, die verbal oder numerisch verankert sind. Bei einer ungeraden Anzahl ist eine neutrale Mitte enthalten. Zur Auswertung werden den Antworten Punktwerte zugewiesen. Negativ formulierte Items sollten für die Analyse umgepolt werden, um einheitliche Interpretationen zu ermöglichen (Marcora et al., 2009; Roesler et al., 2023).

3.1.5 Numerische Ratingskala (NRS)

Die NRS ist eine Skala mit elf Punkten, bei der die Befragten subjektive Symptome – z. B. Schmerz oder Übelkeit – auf einer Skala von 0 (kein Schmerz) bis 10 (maximaler Schmerz) einordnen. Sie wird häufig im klinischen Bereich verwendet, findet aber auch in sportwissenschaftlichen Kontexten Anwendung, wenn subjektives Unwohlsein erfasst werden soll (Wikström et al., 2019; Ho-Jin et al., 2021; LiaBraaten et al., 2021).

3.1.6 Verbale Ratingskala (VRS)

Die VRS ist eine alternative Methode zur NRS und arbeitet mit vorgegebenen verbalen Kategorien. Hier beschreiben die Befragten ihren Zustand mithilfe festgelegter Begriffe wie „kein Schmerz“, „leichter Schmerz“ oder „starker Schmerz“. Sie eignet sich besonders dann, wenn sprachliche Einschätzungen gewünscht oder Zahlen schwer einzuschätzen sind (Wikström et al., 2019; Ho-Jin et al., 2021).

3.1.7 Visuelle Analogskala (VAS)

Die VAS verfolgt einen ähnlichen Zweck wie die zuvor genannten Skalen, nutzt aber visuelle Hilfsmittel wie Linien oder Symbole. Die Befragten markieren ihre Einschätzung auf einer Linie zwischen zwei Extremwerten. Die VAS wird oft eingesetzt, wenn ein besonders intuitives und schnell erfassbares Format benötigt wird (Ho-Jin et al., 2021).

Während subjektive Messmethoden wertvolle Einblicke in die individuelle Wahrnehmung der mentalen Ermüdung liefern, ist es entscheidend, diese durch objektive Messverfahren zu ergänzen. Auf diese Weise kann eine umfassendere Analyse der mentalen Ermüdung und deren Auswirkungen auf die physische Leistung erzielt werden.

3.2 Objektive Messmethoden

Zur umfassenden Erhebung mentaler Ermüdung sowie physischer Leistungsparameter bedarf es objektiver Messverfahren, die unabhängig von der subjektiven Wahrnehmung verlässliche und quantifizierbare Daten liefern. Diese Methoden ermöglichen eine systematische Analyse kognitiver, physiologischer und lokomotorischer Aspekte und sind insbesondere im sportwissenschaftlichen Kontext von hoher Relevanz (Bänsch, 2013; Brochhagen et al., 2022).

3.2.1 Kognitive Leistungstests

Neben subjektiven Einschätzungen stellen kognitive Leistungstests eine wichtige Möglichkeit dar, mentale Ermüdung zu erfassen oder gezielt herbeizuführen. In der Literatur werden verschiedene standardisierte Verfahren beschrieben, die kognitive Beanspruchung auslösen und somit Rückschlüsse auf mentale Ermüdungszustände zulassen. Diese Tests fordern v. a. Aufmerksamkeit, Konzentrationsfähigkeit und Reaktionsschnelligkeit. Häufig eingesetzte Verfahren sind der Stroop-Test und der Go/No-Go-Test (Narmashiri et al., 2023; Sun et al., 2021; McMorris et al., 2018; Habay et al., 2021).

3.2.2 Stroop-Test

Der Stroop-Test ist ein klassisches Verfahren zur Erfassung inhibitorischer Kontrolle und anhaltender Aufmerksamkeit. Proband:innen sollen die Farbe eines Wortes benennen, wobei die Wortbedeutung nicht mit der Farbe übereinstimmt (z. B. das Wort „blau“ in roter Schrift). Die entstehende kognitive Dissonanz erfordert gezielte Aufmerksamkeitssteuerung und Unterdrückung automatisierter Reaktionen (McLeod, 1991). Der Test dient nicht nur der Messung von Aufmerksamkeitsleistungen, sondern wird auch zur gezielten Induktion mentaler Ermüdung eingesetzt. Durch die kontinuierliche Bearbeitung werden kognitive Ressourcen beansprucht, was sich negativ auf nachfolgende sportliche oder geistige Leistungen auswirken kann (McLeod, 1991; Sun et al., 2021; McMorris et al., 2018; Habay et al., 2021; Narmashiri et al., 2023).

3.2.3 Go/No-Go-Test

Der Go/No-Go-Test ist ein etabliertes Verfahren zur Messung kognitiver Kontrolle, insbesondere der Inhibitionsfähigkeit. Proband:innen werden mit einer Serie von Reizen konfrontiert, auf die sie in bestimmten Fällen reagieren („Go“) und in anderen bewusst keine Reaktion zeigen dürfen („No-Go“). Ein Beispiel ist eine visuelle Bildaufgabe, bei der grüne Rechtecke mit einem Tastendruck beantwortet werden sollen, während blaue Rechtecke zu ignorieren sind – unabhängig von deren Ausrichtung. Durch die wiederholte Konfrontation entsteht kognitive Belastung, die über die Zeit zu einem messbaren Ermüdungszustand führen kann (Narmashiri et al., 2023).

3.2.4 EEG-Messung zur Erkennung mentaler Ermüdung

Die Elektroenzephalografie (EEG) ist ein bewährtes Verfahren zur Erfassung neurophysiologischer Veränderungen im Zusammenhang mit mentaler Ermüdung.

Eingesetzt werden sowohl spektrale Leistungsanalysen als auch ereigniskorrelierte Potentiale (ERP), um Rückschlüsse auf kognitive Belastungszustände zu ziehen (Habay et al., 2021; Ding et al., 2024). Habay et al. (2021) berichten u. a. Zunahmen der Theta-Aktivität in frontalen, zentralen und posterioren Regionen sowie verstärkte Alpha-Aktivität in zentralen und posterioren Arealen unter mentaler Ermüdung. In einer ergänzenden Untersuchung beobachteten Ding et al. (2024) hingegen nach einer kognitiv ermüdenden Aufgabe eine Abnahme der Alpha- und Theta-Aktivität bei Tischtennisspielern. Dies deutet darauf hin, dass Art und Verlauf der kognitiven Belastung die Befunde beeinflussen können.

3.2.5 Eye-Tracking und okulometrische Parameter

Neben EEG gilt auch Eye-Tracking als vielversprechende Methode zur Erfassung mentaler Ermüdung. Die Okulometrie – die Analyse augenbezogener Parameter – wird als potenzieller Biomarker für kognitive Ermüdungszustände beschrieben. Tragbare Systeme erfassen u. a. Blinzelfrequenz, Blickdauer, Pupillengröße und Sakkaden (Schweizer et al., 2022; Birenboim et al., 2018). Studien zeigen, dass die Eye-Blink-Rate unter kognitiver Belastung steigen kann; auch die Pupillometrie gilt als geeignetes Instrument zur Beurteilung kognitiver Beanspruchung.

3.2.6 Herzfrequenzvariabilität (HRV) im Kontext mentaler Ermüdung

Das kardiovaskuläre System – insbesondere die HRV – gilt als Indikator des psychophysiologischen Zustands. Niedrige HRV wird häufig mit erhöhtem psychologischem Stress und negativen Emotionen in Verbindung gebracht, höhere HRV-Werte mit entspannteren Zuständen (Birenboim et al., 2018).

Da mentale Ermüdung mit reduzierten kognitiven Ressourcen und gesteigerter Belastung assoziiert ist, erscheint eine Reflexion in HRV-Veränderungen plausibel. Schweizer et al. (2022) verweisen auf HRV-Einsatz zur Erkennung von Schläfrigkeit, einem Zustand in engem Zusammenhang mit mentaler Ermüdung. Ergänzend untersuchten Ding et al. (2024) kardiovaskuläre Parameter wie die Herzfrequenz während der Induktion mentaler Ermüdung.

3.3 Erfassung der lokomotorischen Daten

3.3.1 Systeme basierend auf GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSS-Systeme nutzen Satelliten, um Positions- und Zeitdaten zu erfassen. Ein bekanntes Beispiel ist GPS, das bereits seit den 1970er-Jahren verwendet wird. In der Sportwissenschaft dienen GNSS-Geräte zur Erhebung von Lokomotionsdaten wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung, etwa zur Erstellung von Belastungsprofilen oder zur Steuerung von Trainingseinheiten. Anbieter sind u. a. Catapult, STATSports, Kinexon, Polar, QUS und JOHAN Sports (White et al., 2022; Delves et al., 2022; Coutts & Duffield, 2010).

3.3.2 Systeme basierend auf LPS (Local Positioning Systems)

LPS kommen besonders dann zum Einsatz, wenn GPS-Signale nicht verfügbar oder unzuverlässig sind, z. B. in Hallen oder Stadien. Diese Systeme arbeiten mit lokalen Referenzstationen in Spielfeldnähe und bieten dadurch eine höhere Genauigkeit. Die Positionsberechnung erfolgt häufig über Trilateration. Bekannte Anbieter sind Kinexon, ZXY Sport Tracking, Inmotio sowie Catapult (Kahe & Masoumi Ganjgah, 2018).

3.3.3 Systeme basierend auf Optical Tracking

Optisches Tracking nutzt Kamerasysteme, um Position von Spieler:innen und Ball zu erfassen. Mehrere Kameras werden rund um das Spielfeld installiert und liefern hochfrequente Positionsdaten mit hoher räumlicher Auflösung. Branchenführer ist TRACAB, das für die UEFA und verschiedene Top-Ligen arbeitet. Weitere Anbieter sind Second Spectrum, Stats Perform, Metrica und Spiideo (Linke et al., 2020).

3.3.4 Smartphonebasierte Tracking-Systeme im Fußball

Während spezialisierte Wearables wie jene von Catapult oder QUS eine Vielzahl präziser lokomotorischer und physiologischer Daten liefern, stellt sich die Frage, ob auch Smartphones eine vergleichbare Datenerhebung ermöglichen könnten. Derzeit existieren jedoch keine am Markt erhältlichen Smartphone-Apps, die funktional und qualitativ mit diesen professionellen Systemen gleichzusetzen wären.

3.4 Vergleich der Systeme

3.4.1 Anwendungsbereich

GNSS ist flexibel und nahezu überall einsetzbar, während LPS und optisches Tracking an fest installierte Systeme gebunden sind. Daher eignet sich GNSS besonders für Amateur- und Nachwuchsteams, während die anderen beiden Systeme primär im Profibereich eingesetzt werden (White et al., 2022; Delves et al., 2022; Kahe & Masoumi Ganjgah, 2018).

3.4.2 Genauigkeit und Fehleranfälligkeit

GNSS bietet große Flexibilität, ist jedoch anfälliger für Ungenauigkeiten. Der RMSE-Wert liegt bei etwa 0,5 bis 1 m. LPS-Systeme erreichen Werte zwischen 0,19 und 0,27 m, optisches Tracking sogar nur 0,07 bis 0,09 m.

Während GNSS durch Umwelteinflüsse gestört werden kann, sind optische Systeme z. B. durch Okklusionen oder schlechte Lichtverhältnisse beeinflussbar. LPS bietet eine stabile Genauigkeit, sofern die Umgebung gut abgedeckt ist (White et al., 2022; Delves et al., 2022; Kahe & Masoumi Ganjgah, 2018).

3.4.3 Intrusivität

GNSS- und einige LPS-Systeme erfordern das Tragen von Sensoren oder Westen, was als intrusiv empfunden werden kann. Optische Systeme gelten als nicht intrusiv, da sie ohne Körperkontakt arbeiten und keine Geräte an Spieler:innen erfordern – ein Vorteil im Hochleistungsbereich. Apps für Smartphones, die ähnlich Daten liefern wie die Software-Chip-Kombinationen der genannten Wearables von Catapult und QUS, gibt es noch nicht am Markt.

Obwohl es bereits Versuche von Firmen wie Soctrack gab, die mithilfe einer App, gekoppelt mit Google Maps und ähnlich wie namhafte Trackingsoftware programmiert, Daten von Fußballer:innen im Breitensport aufzeichnen wollten, wurde dieses System aufgrund der Größe der Smartphones und der damit verbundenen Ablehnung beim Zielpublikum nicht weiter ausgereift (White et al., 2022; Delves et al., 2022; Kahe & Masoumi Ganjgah, 2018).

3.4.4 Objektive Messung der Herzfrequenz

Ein weiterer etablierter Bestandteil objektiver Leistungsdiagnostik ist die kontinuierliche Messung der Herzfrequenz. Besonders im sportwissenschaftlichen Kontext haben sich Geräte des finnischen Herstellers Polar Electro bewährt. Die Systeme bieten eine zuverlässige Erhebung kardiovaskulärer Parameter und lassen sich gut in bestehende Trainings- und Analysetools integrieren (Teixeira et al., 2021; Power et al., 2022). In zahlreichen Studien kamen unterschiedliche Modelle wie die Polar SR 400 oder das Polar Team System (1 Hz und 5 Hz) zur Anwendung.

Diese Systeme erlauben die Erfassung der Herzfrequenz in Echtzeit, sowohl bei Einzelsportarten als auch in Teamszenarien. Darüber hinaus wurden Varianten wie das Polar NV-System sowie die Polar Vantage NV und WearLink®-Technologie eingesetzt, letztere sogar in Verbindung mit lokalen Positionssystemen (Habay et al., 2021).

3.4.5 Kombinationssysteme

Unternehmen wie Catapult und QUS verfolgen das Ziel, ihre Wearable-Technologien weiterzuentwickeln und Systeme anzubieten, die eine gleichzeitige Erfassung interner und externer Belastungsdaten ermöglichen.

So verfügt beispielsweise die Vector S7-Weste von Catapult über integrierte Sensoren zur Aufzeichnung der Herzfrequenz, wodurch eine unmittelbare Verknüpfung von physiologischen und lokomotorischen Daten gegeben ist.

Auch die neueste Generation der sogenannten On-Board Unit von QUS ist darauf ausgelegt, neben klassischen Bewegungsdaten zusätzlich Parameter wie Herzfrequenz und Atemfrequenz in Echtzeit zu erfassen (catapult.com; qus.tech).

Die erfassten Daten aus den beschriebenen Messmethoden ermöglichen es, die folgenden Hypothesen zu testen, die sich auf den Zusammenhang zwischen mentaler Ermüdung und physischen Leistungsparametern beziehen. Im Folgenden werden die spezifischen Hypothesen formuliert, die im Rahmen der statistischen Analyse überprüft werden (siehe oben).

3.5 Finales Forschungsdesign

Folgende Forschungsfragen und Hypothesen lassen sich zu dem Thema aufstellen:

Inwiefern beeinflusst geistige Erschöpfung die körperliche Leistungsfähigkeit eines männlichen Fußballspielers?

Inwieweit lässt sich geistige Ermüdung anhand der GPS-Parameter erkennen?

H1: Mentale Ermüdung lässt sich anhand der erhobenen Beschleunigungsparameter erkennen.

H1₀: Mentale Ermüdung lässt sich nicht anhand der erhobenen Beschleunigungsparameter erkennen.

H2: Mentale Ermüdung lässt sich anhand der erhobenen Laufintensitäten (Player Load) erkennen.

H2₀: Mentale Ermüdung lässt sich nicht anhand der erhobenen Laufintensitäten (Player Load) erkennen.

H3: Mentale Ermüdung lässt sich anhand der erhobenen gelaufenen Distanz erkennen.

H3₀: Mentale Ermüdung lässt sich nicht anhand der erhobenen gelaufenen Distanz erkennen.

Für die Testung wurden insgesamt 20 Spieler (10 Kampfmannschaftsspieler sowie 10 Spieler der zweiten Mannschaft) des Regionalligavereins (3. österreichische Liga) TWL Elektra einbezogen. Die Spieler absolvierten über vier Wochen zweimal wöchentlich eine 5-minütige Session, bei der sie mit Tracking-Shirts der Firma QUS-Tech überwacht wurden. Für die Studie wurden die Spieler in zwei Teams zu je vier Spielern aufgeteilt, um anschließend 4 vs. 4 zwei Minuten lang zu spielen. Nach einer einminütigen Pause absolvierten sie einen weiteren Durchgang. Die im Vorhinein erhobene mentale Ermüdung wurde von den Spielern auf einer Skala von 1–10 angegeben. Diese Angabe dient als Vergleichswert für die biometrischen Daten der Spieler.

Durch diverse Problematiken, die der Amateurfußball mit sich bringt, bestand die Trainingsgruppe nicht immer aus denselben Spielern. Allerdings konnten von allen 20 Spielern jeweils acht individuell miteinander vergleichbare Datensätze erhoben werden. Positionsdaten, Beschleunigungen und während der SSG zurückgelegte Distanz wurden mit 10-Hz-GPS-Geräten (QUS-Tech) erfasst (Coutts & Duffield, 2010). Die über GPS-Geräte ermittelten Breiten- und Längengrade der Spieler wurden exportiert und mithilfe der firmeneigenen Software QUS Performance berechnet.

Die erhobenen Beschleunigungs-Daten wurden in acht Zonen aufgeteilt, wobei der positive Höchstwert bei 10 m/s² und der negative Höchstwert bei -10 m/s² liegt. Die Zoneneinteilung der QUS Performance-Software sieht wie folgt aus:

Negative Beschleunigung

- Zone 1: -10 bis -4 m/s²
- Zone 2: -4 bis -3 m/s²
- Zone 3: -3 bis -1,5 m/s²
- Zone 4: -1,5 bis 0 m/s²

Positive Beschleunigung

- Zone 5: 0 bis 1,5 m/s²
- Zone 6: 1,5 bis 3 m/s²
- Zone 7: 3 bis 4 m/s²
- Zone 8: 4 bis 10 m/s²

4 Forschungsstand

Unter mentaler Ermüdung (ME) wird ein psychobiologischer Zustand verstanden, der durch anhaltende kognitiv anspruchsvolle Tätigkeiten entsteht und die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigt (Boksem et al., 2005; Pageaux et al., 2014). ME entwickelt sich graduell und zeigt sich objektiv in Leistungsabnahmen sowie subjektiv in wachsendem Widerstand gegen fortgesetzte Anstrengung, Müdigkeitsgefühl, Energiemangel und Stimmungsschwankungen (Habay et al., 2021; Lam et al., 2021; Van Cutsem et al., 2017; Marcora et al., 2009; Meijman, 2000). Im Sportkontext wird sie als nachlassende Fähigkeit beschrieben, über längere Zeit konzentriert zu bleiben und Informationen effizient für Entscheidungen zu verarbeiten (Lam et al., 2023). Athlet:innen bezeichnen dies umgangssprachlich als „vollen Kopf“: Reizüberflutung erschwert die Nutzung relevanter Hinweise und wirkt sich auf die Qualität technischer Ausführungen aus (Smith et al., 2016). Außerhalb des Spitzensports ist ME zudem mit eingeschränkter Emotionsregulation verknüpft (Grillon et al., 2015).

4.1 Definition und Erfassung mentaler Ermüdung

Die Definition und Erfassung mentaler Ermüdung stellt eine zentrale Herausforderung der Sportwissenschaft dar. Dies liegt vor allem in der Mehrdimensionalität des Phänomens begründet, das psychologische, physiologische und verhaltensbezogene Komponenten umfasst.

Unter mentaler Ermüdung wird ein psychobiologischer Zustand verstanden, der durch anhaltende kognitiv anspruchsvolle Tätigkeiten entsteht und zu einer Einschränkung der kognitiven Leistungsfähigkeit führt (Boksem et al., 2005; Pageaux et al., 2014).

ME entwickelt sich schrittweise über die Zeit und äußert sich sowohl objektiv – etwa durch nachlassende Leistung – als auch subjektiv durch ein zunehmendes Gefühl der Erschöpfung, Motivationsminderung und einen wachsenden Widerstand gegen fortgesetzte Anstrengung (Habay et al., 2021; Marcora et al., 2009; Van Cutsem et al., 2017).

Um die Komplexität des Phänomens im Leistungssport besser zu erfassen, entwickelten Smith et al. 2018 ein konzeptionelles Modell mentaler Ermüdung, das spezifisch auf die Anforderungen des Fußballsports zugeschnitten ist. Dieses Modell beschreibt sportartspezifische Reize, Mechanismen und Konsequenzen von ME und verdeutlicht, dass mentale Ermüdung sowohl die Informationsverarbeitung als auch das Entscheidungsverhalten und die motorische Leistungsfähigkeit beeinflusst.

Gleichwohl besteht weiterhin Forschungsbedarf, um ME sportartenübergreifend zu operationalisieren und valide Messinstrumente zu etablieren. Eine präzisere Definition und standardisierte Erfassung würden nicht nur die ökologische Validität zukünftiger Studien erhöhen, sondern auch praktische Implikationen für Trainingssteuerung, Leistungsdiagnostik und Regeneration im Hochleistungssport schaffen (Smith, Coutts et al., 2016; Coutts, 2017).

Die Erfassung mentaler Ermüdung erfolgt über eine Kombination aus subjektiven und objektiven Verfahren. Subjektive Methoden nehmen dabei eine zentrale Rolle ein, da Ermüdung primär als individuell wahrgenommener, aversiver Zustand erlebt wird, der mit einem gesteigerten Widerstand gegenüber fortgesetzter Anstrengung einhergeht (Chaudhuri et al., 2004; Boksem et al., 2005; Tran et al., 2020). Objektive Verfahren hingegen liefern ergänzende Informationen über physiologische und neuronale Prozesse, die der subjektiven Wahrnehmung zugrunde liegen.

4.2 Zusammenhang zwischen Intelligenz und mentaler Ermüdung

Die Hypothese der neuronalen Effizienz (Neural Efficiency Hypothesis, NEH) beschreibt den Zusammenhang zwischen Intelligenz und der ökonomischen Nutzung neuronaler Ressourcen.

Sie geht davon aus, dass intelligendere Personen bei der Bewältigung kognitiver Aufgaben eine geringere, aber zielgerichtete Gehirnaktivierung zeigen, da sie Energie auf relevante Areale konzentrieren und unnötige Aktivierungen vermeiden (Neubauer & Fink, 2009).

Dieses Prinzip gilt vor allem bei Aufgaben niedriger bis mittlerer Schwierigkeit, bei denen höhere Intelligenz mit einem geringeren Energieaufwand und einer effizienteren Verarbeitung einhergeht.

Steigt jedoch die kognitive Komplexität, kehrt sich dieses Muster teilweise um: Hochintelligente Personen investieren dann gezielt mehr neuronale Ressourcen, um anspruchsvolle Aufgaben zu bewältigen, während weniger leistungsfähige Individuen früher an ihre Grenzen stoßen oder die Anstrengung reduzieren.

Diese Dynamik lässt sich mit einem erfahrenen Läufer der nach einem 2000-m-Lauf bei gleicher Geschwindigkeit weniger erschöpft als ein Amateur ist vergleichen. Der erfahrene Läufer wirkt weniger erschöpft, nicht weil er weniger arbeitet, sondern weil sein System effizienter arbeitet. In ähnlicher Weise verbrauchen kognitiv leistungsfähige Personen bei gleichbleibender Aufgabe weniger mentale Energie. Zudem ist neuronale Effizienz nicht statisch, sondern trainierbar: Nach wiederholtem Üben kognitiver Aufgaben zeigen sich bei intelligenten Individuen besonders deutliche Reduktionen der Hirnaktivierung, was auf eine verbesserte Anpassung und energetisch sparsamere Informationsverarbeitung hinweist (Neubauer & Fink, 2009).

4.3 Subjektive Erfassungsmethoden

Zur Erfassung von ME werden bewährte subjektive Ratings eingesetzt. Die Borg-Skala (6–20) bildet die wahrgenommene Belastung ab; der Skalenwert korrespondiert näherungsweise mit der Herzfrequenz (Borg, 1998). RPE- und RIR-Skalen quantifizieren Anstrengung bzw. verbleibende Wiederholungen und unterstützen die Belastungssteuerung insbesondere im Kraft- und Intervalltraining (Scherr et al., 2012; Gjestvang et al., 2024; LiaBraaten et al., 2023; Jiang et al., 2022). Likert-Skalen (5–11 Stufen) erfassen Zustimmung/Ablehnung zu Aussagen zu Motivation, Konzentration und Beanspruchung (Marcora et al., 2009; Roesler et al., 2023). NRS/VRS erlauben eine schnelle numerische (0–10) bzw. verbale Einordnung subjektiver Zustände; VAS nutzt eine Markierung zwischen Extrempolen und ist besonders intuitiv (Wikström et al., 2019; Ho-Jin et al., 2021). Subjektive Ratings sind sensibel für den psychologischen Zustand, sollten aber mit objektiven Indikatoren kombiniert werden.

4.4 Objektive Erfassungsmethoden

Objektive Verfahren basieren auf neurophysiologischen und leistungsbezogenen Indikatoren, die Rückschlüsse auf zentrale Ermüdungsprozesse zulassen. Bildgebende Verfahren wie die Positronen-Emissions-Tomographie (PET), die Single-Photon-Emissions-Computertomographie (SPECT) oder die Magnetresonanz-Spektroskopie (MRS) werden genutzt, um neuronale Stoffwechselveränderungen während kognitiver Belastung zu untersuchen (Chaudhuri et al., 2004).

Verhaltensbezogen äußert sich ME in einer erhöhten subjektiven Anstrengungswahrnehmung, bei der Betroffene physische und kognitive Aufgaben als deutlich fordernder erleben und mehr Energie aufwenden müssen, um ein vergleichbares Leistungsniveau zu erreichen (Marcora et al., 2009; McMorris et al., 2018; Sun et al., 2022). Häufig treten kognitive Einschränkungen auf, etwa verringerte Konzentrationsfähigkeit, langsamere Reaktionen, verminderte Motivation oder geringere Genauigkeit bei Aufgaben (Smith et al., 2016; Lam et al., 2023; Thompson et al., 2020; Russell et al., 2019).

In einer Studie mit Fußball-Akademiespielern identifizierten Thompson et al. (2020) die häufigsten subjektiven Merkmale mentaler Ermüdung als Schwierigkeiten, die Konzentration aufrechtzuerhalten (55 %), verringerte Motivation (43,5 %) und Probleme bei der Fehlerverarbeitung (37,3 %).

Diese Befunde bestätigen, dass ME primär durch eine Beeinträchtigung kognitiver Kontrollprozesse und motivationaler Regulation gekennzeichnet ist. Zudem berichten Athlet:innen über emotionale Reizbarkeit, Rückzugstendenzen und das Gefühl geistiger Überforderung oder eines „vollen Kopfes“ (Russell et al., 2019).

Als weitere Methode zur Erhebung mentaler Ermüdung hat sich das sogenannte Eye-Tracking etabliert. Die Okulometrie analysiert verschiedene augenbezogene Parameter wie Blinzelfrequenz, Blickdauer, Pupillengröße und Sakkaden, die Aufschluss über den kognitiven Ermüdungszustand geben können (Schweizer et al., 2022; Birenboim et al., 2018). Unter anhaltender mentaler Belastung verändern sich diese Merkmale typischerweise: So steigt etwa die Blinzelfrequenz, während die Pupillengröße und die Dauer einzelner Fixationen variieren, was auf eine zunehmende kognitive Beanspruchung und abnehmende visuelle Aufmerksamkeit hinweist.

Kashevnik et al. (2024) erweiterten diesen Ansatz, indem sie spezifische Augenbewegungsmerkmale identifizierten, die besonders sensitiv auf mentale Ermüdung reagieren.

Dazu zählen die durchschnittliche Geschwindigkeit innerhalb des Fixationsbereichs, die Krümmung der Blickbahn, die minimale Sakkadenlänge sowie der Anteil kurzer Fixationen (<150 ms). Veränderungen dieser Parameter spiegeln eine eingeschränkte visuelle Verarbeitung und eine gestörte Fokussierung wider, wie sie typischerweise bei zunehmender Ermüdung auftreten. Mithilfe von Machine-Learning-Verfahren – insbesondere dem Random-Forest-Algorithmus – gelang es, den mentalen Ermüdungszustand mit hoher Genauigkeit (0.85) und einem F1-Score von 0.80 zu klassifizieren.

Die Kombination aus okulometrischen Daten und algorithmischer Auswertung ermöglicht somit eine objektive, echtzeitfähige Erkennung mentaler Ermüdung. Damit stellt Eye-Tracking einen wertvollen komplementären Ansatz zur neurophysiologischen Messung dar, um kognitive Leistungszustände im Sport oder in komplexen Entscheidungssituationen präzise zu erfassen (Kashevnik et al., 2024). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mentale Ermüdung ein vielschichtiges psychobiologisches Phänomen ist, das sich in kognitiven, emotionalen und physiologischen Dimensionen äußert. Ihre Erfassung erfordert einen multimodalen Ansatz, der subjektive Ratings mit objektiven Messgrößen verknüpft, um ein ganzheitliches Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen zu ermöglichen.

Im Anschluss an die definitorische und methodische Einordnung wird im folgenden Kapitel auf die biologischen Grundlagen mentaler Ermüdung eingegangen. Mentale Ermüdung ist kein rein psychologisches Konstrukt, sondern beruht auf komplexen Prozessen innerhalb des zentralen Nervensystems, die sowohl neurochemische als auch neurophysiologische Veränderungen umfassen.

4.5 Neurophysiologische und neurochemische Mechanismen mentaler Ermüdung

Die Entstehung mentaler Ermüdung beruht auf einem komplexen Zusammenspiel biochemischer und neuronaler Prozesse, die sowohl auf molekularer als auch auf systemischer Ebene ablaufen. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Botenstoff Adenosin, der sich infolge intensiver körperlicher oder kognitiver Aktivität im Gehirn akkumuliert (Chaudhuri et al., 2004; Porkka-Heiskanen, 1999; Scammell, 2015).

Adenosin ist ein wesentlicher Bestandteil des universellen Energieträgers Adenosintriphosphat (ATP) und wirkt zugleich als neuromodulatorischer Faktor, der die neuronale Aktivität hemmt und entzündungshemmende Effekte auf das Gewebe ausübt (Cunha et al., 2016; Dunwiddie et al., 2001). Während sich Adenosin im Verlauf geistiger oder physischer Beanspruchung kontinuierlich anreichert, wird es im Schlaf wieder abgebaut, wodurch der physiologische Gleichgewichtszustand und die neuronale Leistungsfähigkeit des Gehirns wiederhergestellt werden (Porkka-Heiskanen, 1999; Scammell, 2015).

Auf mentaler Ebene gilt Adenosin als entscheidender Mediator der subjektiven Anstrengungswahrnehmung, da es die neuronale Erregbarkeit senkt und dadurch das Gefühl geistiger Erschöpfung sowie die Abneigung gegenüber fortgesetzter Anstrengung verstärkt (Newsholme et al., 1996). Somit stellt Adenosin eine direkte Verbindung zwischen Energiehaushalt, neuronaler Aktivität und dem Erleben mentaler Ermüdung her.

Parallel zu diesen metabolischen Vorgängen lassen sich auf neurophysiologischer Ebene deutliche Veränderungen der Gehirnaktivität beobachten, die insbesondere mithilfe der Elektroenzephalographie (EEG) messbar sind. Bereits frühe Studien zeigten, dass während lang andauernder kognitiver Beanspruchung vor allem die Alpha-, Theta- und Betawellen ansteigen, wobei die erhöhte Alpha- und Theta-Aktivität als Zeichen einer reduzierten kortikalen Erregung interpretiert wird (Boksem et al., 2005). Klimesch (1999) argumentierte, dass eine verstärkte Alpha-Aktivität auf den Versuch des Gehirns hindeutet, Aufmerksamkeit und Wachheit trotz Ermüdung aufrechtzuerhalten, während eine erhöhte Beta-Aktivität als Ausdruck gesteigerter kognitiver Anstrengung gilt.

Neuere Befunde bestätigen, dass ME mit einer deutlichen Verschiebung der EEG-Leistung hin zu niederfrequenten Frequenzbändern (Delta, Theta, Alpha) einhergeht, während die Veränderungen in höheren Frequenzbereichen (Beta) schwächer und weniger konsistent ausfallen (Wascher et al., 2013; Tran et al., 2020). Besonders stark ausgeprägt ist die frontale Theta-Aktivität, die als Marker erhöhter kognitiver Kontrolle gilt und den zusätzlichen mentalen Aufwand widerspiegelt, trotz Ermüdung ein Leistungsniveau aufrechtzuerhalten (Wascher et al., 2013; Boksem et al., 2005; Tran et al., 2020).

Darüber hinaus zeigt sich in zentralen und posterioren Hirnregionen eine signifikante Zunahme der Alpha-Aktivität, die mit einer stärkeren Hinwendung zu inneren Prozessen und einer verringerten Reizverarbeitung in der Umgebung assoziiert ist (Tran et al., 2020; Wascher et al., 2013).

Diese Muster deuten auf eine Reduktion der sensorischen Aufmerksamkeit und eine eingeschränkte Fähigkeit hin, externe Informationen effizient zu integrieren – ein zentrales Merkmal mentaler Ermüdung. Ergänzend belegen aktuelle EEG-Analysen, dass ME mit strukturellen Veränderungen der neuronalen Kommunikation einhergeht.

Eine Abnahme der Lempel-Ziv-Komplexität (LZC) weist auf eine geringere neuronale Variabilität und damit auf eine reduzierte Informationsverarbeitungskapazität hin, während eine verminderte spektrale Kohärenz (SCV) im Beta-Band auf eine geschwächte funktionelle Konnektivität zwischen den Hemisphären schließen lässt (Xu et al., 2018).

Die stärksten EEG-Veränderungen treten in den zentralen Regionen der Kopfhaut auf, was deren besondere Bedeutung für die Aufmerksamkeitssteuerung und die Regulation der Leistungsbereitschaft unterstreicht (Tran et al., 2020).

Zusammenfassend verdeutlichen diese Befunde, dass mentale Ermüdung sowohl auf neurochemischer als auch auf neurophysiologischer Ebene tiefgreifende Veränderungen im zentralen Nervensystem hervorruft. Die Anreicherung von Adenosin, die Verschiebung der Gehirnwellenaktivität hin zu niedrigeren Frequenzen sowie die damit verbundene Abnahme der kortikalen Erregung spiegeln die zentrale Rolle wider, die neuronale und metabolische Prozesse bei der Entstehung und Aufrechterhaltung mentaler Ermüdung spielen. Diese physiologischen Grundlagen bilden die Voraussetzung für ein besseres Verständnis ihrer praktischen Auswirkungen auf Wahrnehmung, Entscheidungsverhalten und sportliche Leistungsfähigkeit, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

4.6 Auswirkungen mentaler Ermüdung

Mentale Ermüdung stellt im Leistungssport – insbesondere im Fußball – einen zentralen Einflussfaktor dar, der sowohl psychologische als auch physiologische Prozesse betrifft und sich in vielfältigen Leistungsbereichen bemerkbar macht. Als psychobiologischer Zustand entsteht sie durch anhaltende kognitive Beanspruchung, die eine fortwährende Aufmerksamkeit, Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung erfordert (Smith et al., 2018). Mit zunehmender Dauer solcher Belastungen kommt es zu einem subjektiven Gefühl geistiger Erschöpfung, Energiemangel und einer wachsenden Abneigung, komplexe Aufgaben fortzusetzen (Chaudhuri, 2004; Smith et al., 2016). Diese Zustände führen zu einer veränderten Wahrnehmung von Anstrengung, wodurch kognitive und emotionale Ressourcen schneller erschöpft werden und die Fähigkeit zur Leistungsregulation sinkt (Marcora et al., 2009; Van Cutsem et al., 2017).

Im sportlichen Kontext wirkt sich ME auf mehreren Ebenen aus: Sie beeinträchtigt die Aufmerksamkeit, die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und die Qualität von Entscheidungen (Thompson et al., 2020). Dies hat unmittelbare Folgen für taktische und technische Prozesse wie Passgenauigkeit, Ballkontrolle und Schussausführung, die in hohem Maße von Konzentration und Reaktionsfähigkeit abhängen (Smith et al., 2018).

Auch die physische Leistungsfähigkeit kann indirekt darunter leiden, da die erhöhte subjektive Anstrengungswahrnehmung (Ratings of Perceived Exertion, RPE) zu einer vorzeitigen Ermüdung und reduzierten Bewegungsintensität führt (McMorris, 2020).

Die folgenden Abschnitte beleuchten die vielfältigen Auswirkungen mentaler Ermüdung auf die Leistungsfähigkeit von Athlet:innen. Dabei wird differenziert dargestellt, in welchem Ausmaß ME physische, technische, kognitive, emotionale und taktische Leistungsaspekte beeinflusst und wie sich diese Veränderungen sowohl auf individueller als auch auf mannschaftlicher Ebene manifestieren. Durch die Zusammenführung empirischer Befunde aus Labor- und Feldstudien wird deutlich, dass mentale Ermüdung als übergreifender Belastungsfaktor die sportliche Leistungsproduktion wesentlich mitbestimmt und damit eine zentrale Rolle in der Trainings- und Wettkampfsteuerung einnimmt.

4.7 Leistungsauswirkungen – individuell

4.7.1 Einfluss mentaler Ermüdung auf das Herz-Kreislauf-System

Mentale Ermüdung wirkt sich nicht nur auf kognitive und neuronale Prozesse aus, sondern beeinflusst auch das autonome Herz-Kreislauf-System, insbesondere über Veränderungen der Herzfrequenzvariabilität (HRV) und des Sauerstoffverbrauchs.

In einer Studie von Lee et al. (2022) wurde gezeigt, dass anhaltende kognitive Belastung charakteristische Veränderungen der frequenzbasierten HRV-Parameter hervorruft. Während der Niederfrequenzanteil (LFn) im Verlauf der Aufgabe zunimmt, nimmt die normalisierte Hochfrequenzleistung (HF_n) ab, was zu einem Anstieg des LF/HF-Verhältnisses führt. Da HF_n als Indikator der parasympathischen Aktivität und LFn als Maß sowohl sympathischer als auch parasympathischer Einflüsse gilt, deutet dieses Muster auf eine Verschiebung der sympathovagalen Balance hin – von einer dominierenden parasympathischen zu einer verstärkten sympathischen Aktivierung. Dieses physiologische Profil entspricht der typischen Reaktion auf Ermüdung und gesteigerte mentale Beanspruchung.

Bemerkenswert ist, dass die beobachteten HRV-Veränderungen unabhängig von der technischen Erfassungsqualität konsistent bleiben, sofern die EKG-Abtastrate mindestens 125 Hz beträgt. Damit bietet die frequenzbasierte HRV-Analyse ein verlässliches Instrument, um den Verlauf mentaler Ermüdung objektiv zu erfassen und mit subjektiven Einschätzungen oder Leistungsparametern zu kombinieren. Im sportwissenschaftlichen Kontext ermöglicht sie, kognitive Belastung während komplexer Trainingsphasen oder taktisch anspruchsvoller Spielsituationen zu erkennen und daraus gezielte Regenerations- oder Steuerungsmaßnahmen abzuleiten.

Die Veränderungen von HF_n, LF_n und LF/HF können somit als physiologische Marker einer zunehmenden sympathischen Dominanz interpretiert werden, die den mentalen Ermüdungszustand widerspiegelt (Lee et al., 2022).

Ergänzend hierzu untersuchten Smith et al. (2015) den Einfluss mentaler Ermüdung auf den Sauerstoffverbrauch (VO₂max) während eines selbstgesteuerten, hochintensiven Intervalllaufes. Sie fanden eine signifikant geringere Sauerstoffaufnahme in der mental ermüdeten Bedingung ($34,0 \pm 4,9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) im Vergleich zur Kontrollgruppe ($36,0 \pm 4,0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; $p = 0,007$). Da weder Herzfrequenz, Blutlaktat noch Glukosewerte Unterschiede zeigten, wird dieser Effekt nicht auf physiologische Veränderungen, sondern auf die selbstgewählte, niedrigere Laufgeschwindigkeit zurückgeführt. Dies verdeutlicht, dass mentale Ermüdung über veränderte Anstrengungswahrnehmung und Motivation indirekt auch kardiovaskuläre Leistungsparameter beeinflussen kann.

4.7.2 Emotionsregulierung

Emotionen und die Regulation dieser, spielen sowohl im Spitzen-, wie auch im Breitensport eine große Rolle. Grillon et al. 2015 untersuchten in einer Studie mit 28 Proband:innen, den Einfluss mentaler Ermüdung auf die Emotionsregulation. Erkenntnisse dieser Studie waren unter anderem, dass die Emotionsregulation durch Erschöpfung gestört wurde.

Diese hatte zwar keinen Einfluss auf die Emotionsreaktivität (Häufigkeit und Intensität der Emotionen), es wird aber angenommen, dass implizite und explizite Selbstregulierungsmechanismen immer dann wirksam sind, wenn Emotionen erzeugt werden. Dadurch ist zu erwarten, dass die durch mentale Ermüdung beeinflusste Selbstregulation, eine Erzeugung von Emotionen begünstigen könnte. Die Studie von Grillon et al. 2015 kam in Bezug auf den Einfluss mentaler Ermüdung auf die Regulierung der Emotionen zu zwei Hauptkenntnissen. Einerseits können schwierige Aufgaben zu

Frustration führen, was wiederum eine negative Stimmung zur Folge hätte. Diese negative Stimmung hätte folglich Einfluss auf die Leistung.

Andererseits könnte geistige Ermüdung zu einer verminderten Motivation führen, gute Leistungen zu erbringen (Muraven und Slessareva, 2003).

4.7.3 Passtechnik

Mentale Ermüdung hat einen nachgewiesenen negativen Einfluss auf die Passtechnik und die damit verbundenen technischen Fertigkeiten, die in komplexen Sportarten erforderlich sind (Kölling et al. 2019; Smith et al. 2018). Die Passtechnik gilt als wichtige Messgröße der offensiven Technik im Fußball, da erfolgreiche Teams mehr Pässe abschließen können und ein signifikanter Prozentsatz der Tore durch Pässe erzielt wird (Sun et al. 2022).

Mehrere Studien zeigten, dass ME die technische Leistung in fußballspezifischen Small-Sided Games (SSG) beeinträchtigt, wobei die Auswirkungen hauptsächlich mit Pässen, Abfangen (interceptions) und Schüssen (shots) in Verbindung gebracht wurden (Fortes et al. 2019; Sun et al. 2021; Sun et al. 2022). Konkret wurde gezeigt, dass Spieler:innen im Zustand mentaler Ermüdung mehr Fehler beim Passspiel oder bei der Ballkontrolle machten (Kölling et al. 2019). So fanden Smith et al. (2016) heraus, dass ME die fußballspezifische technische Leistung beeinträchtigt (Sun et al. 2022; Marques-Jimenez et al. 2017). Ebenso beeinträchtigt ME die Entscheidungsfindung beim Passen (passing decision making) (Fortes et al. 2019), da die Spieler Schwierigkeiten haben, die relevanten Umgebungsinformationen rechtzeitig wahrzunehmen und ihre Entscheidungen entsprechend anzupassen (Sun et al. 2021; Ding et al. 2024).

Allerdings lieferte eine Meta-Analyse in Bezug auf die reine Passgenauigkeit keine signifikanten Auswirkungen auf die Anzahl der Pässe, den Prozentsatz genauer Pässe oder die Anzahl erfolgreicher Pässe (Sun et al. 2022). Trotz dieser inkonsequenten Ergebnisse der Meta-Analyse in Bezug auf die Passfähigkeiten, wird die Verschlechterung technischer Fertigkeiten, wie der Passtechnik, durch Beeinträchtigungen exekutiver Funktionen erklärt, zu denen eine eingeschränkte Aufmerksamkeitslenkung und eine reduzierte Fähigkeit zur Fehlerüberwachung und Anpassung (reduced performance monitoring/adjustment) gehören (Sun et al. 2022; Kölling et al. 2019; Ding et al. 2024; Smith et al. 2018).

4.7.4 Dribbling

Trecroci et al. (2020) untersuchten den Einfluss mentaler Ermüdung auf die Dribbelleistung im Fußball und konnten zeigen, dass insbesondere die Entscheidungsgenauigkeit beim

Dribbling deutlich beeinträchtigt wird. In dieser Studie wurde der Effekt mentaler Ermüdung während fußballspezifischer Kleinfeldspiele (SSG) analysiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Entscheidungssicherheit beim Dribbling unter mentaler Belastung signifikant abnahm. Die durchschnittliche Entscheidungsgenauigkeit sank in der mental ermüdeten Gruppe auf 41,3 % (SD = 32,2 %), während sie in der Kontrollgruppe bei 75,3 % (SD = 35,5 %) lag – was einer relativen Reduktion von etwa 45 % entspricht. Diese Verschlechterung wird darauf zurückgeführt, dass mentale Ermüdung zentrale kognitive Prozesse wie Aufmerksamkeit, Wahrnehmung und Handlungsplanung beeinträchtigt. Spieler:innen, die sich in einem Zustand mentaler Ermüdung befinden, neigen folglich dazu, weniger optimale Entscheidungen zu treffen, etwa durch unpassendes Dribbling oder fehlerhafte Raumwahrnehmung, wodurch sich die Spielstruktur und das Angriffspotenzial ihres Teams verschlechtern können.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung ausreichender mentaler Erholung, da kognitiv fordernde Tätigkeiten vor spielnahen Trainingseinheiten die technischen und taktischen Fertigkeiten, insbesondere im Dribbling, negativ beeinflussen können (Trecroci et al., 2020).

4.7.5 Zweikampfverhalten

Mentale Ermüdung hat einen nachweislich negativen Einfluss auf das Zweikampfverhalten von Fußballspieler:innen und führt insbesondere zu einer Verschlechterung der defensiven Leistungsfähigkeit. Eine systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse von Sun et al. (2022) zeigte, dass ME technische Fertigkeiten wie Tacklings signifikant beeinträchtigt. Dabei wurde ein deutlicher Rückgang sowohl der Gesamtzahl als auch der Erfolgsquote von Zweikämpfen festgestellt. Konkret ergab die Analyse eine Effektgröße von $ES = -0,739$ ($p = 0,005$) für die Gesamtzahl der Tackles sowie $ES = -0,628$ ($p = 0,022$) für erfolgreiche Tackles. Diese Werte weisen auf eine signifikante Reduktion sowohl der Häufigkeit als auch der Qualität defensiver Aktionen hin. Spieler:innen, die unter mentaler Ermüdung leiden, führen somit nicht nur weniger Zweikämpfe, sondern entscheiden diese auch seltener für sich. Obwohl einzelne frühere Studien keinen signifikanten Zusammenhang feststellen konnten, verdeutlichen die aggregierten Befunde, dass mentale Ermüdung einen relevanten Einfluss auf die defensive Stabilität und Reaktionsfähigkeit hat. Für Trainer:innen bedeutet dies, dass mentale Belastung und Erholungsmanagement gezielt in die Trainingssteuerung einbezogen werden sollten, um die Zweikampfstärke und Konzentrationsfähigkeit, insbesondere in späten Spielphasen, aufrechtzuerhalten (Sun et al., 2022).

4.7.6 Verringerung der zurückgelegten Gesamtstrecke

Zahlreiche Studien belegen, dass mentale Ermüdung die Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse von Fußballspieler:innen maßgeblich beeinträchtigt. Sie reduziert die Fähigkeit, relevante Umweltreize zu erkennen, richtig zu interpretieren und das eigene Verhalten daran anzupassen (Boksem et al., 2006; Lorist et al., 2005). Diese kognitive Einschränkung wirkt sich besonders auf die räumliche Orientierung und Positionierung auf dem Spielfeld aus. Unter mentaler Ermüdung sinken Aufmerksamkeit, Reaktionsgeschwindigkeit und Entscheidungsqualität, wodurch Spieler:innen häufiger unpassende Bewegungen ausführen oder Abstände zu Mit- und Gegenspieler:innen falsch einschätzen (Coutinho et al., 2017).

Eine Studie von M. R. Smith et al. (2016) zeigte, dass ermüdete Spieler:innen zwar eine gleichmäßigere Distanz zu ihren Mitspieler:innen hielten, jedoch eine deutlich geringere Synchronität ihrer Positionsänderungen aufwiesen. Dies weist darauf hin, dass ME die sensorische Integration und kollektive Koordination innerhalb der Mannschaft beeinträchtigt. Coutinho et al. (2018) bestätigten diese Ergebnisse und fanden, dass mentale Ermüdung zwar kaum Einfluss auf reine physische Leistungsparameter hatte, jedoch zu einer verringerten Regelmäßigkeit der Abstände zwischen Spieler:innen führte. Diese verringerte räumliche Abstimmung kann taktische Abläufe destabilisieren und die kollektive Anpassungsfähigkeit im Spiel mindern. Insgesamt verdeutlichen die Befunde, dass mentale Ermüdung nicht nur individuelle, sondern auch gruppenspezifische Prozesse stört und somit einen entscheidenden Einfluss auf die taktische Kohärenz und die Spielorganisation einer Mannschaft ausübt.

4.7.7 Verringerung der Strecke mit hoher Geschwindigkeit

Mentale Ermüdung wirkt sich deutlich negativ auf die körperliche Leistungsfähigkeit von Fußballspieler:innen aus, insbesondere auf Bewegungen mit hoher Intensität. Studien, die mittels GPS-Tracking während fußballspezifischer SSG durchgeführt wurden, zeigen, dass Spieler:innen unter mentaler Ermüdung deutlich weniger Distanz in hohen Geschwindigkeitsbereichen (über 16 km/h) zurücklegen (Coutinho et al., 2018). Das Verhältnis der bei hoher Geschwindigkeit absolvierten Strecke verringerte sich dabei im Vergleich zur Kontrollbedingung um etwa 32 %, was als kleiner, aber relevanter Effekt einzustufen ist. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass mentale Ermüdung vor allem die Fähigkeit beeinträchtigt, wiederholt hochintensive Aktionen auszuführen.

Ergänzend fanden Staiano et al. (2023) im Repeated Sprint Ability (RSA) Test eine signifikante Verlangsamung der durchschnittlichen Sprintzeiten und einen erhöhten Leistungsabfall während Phasen mit Richtungswechseln. Diese Effekte traten insbesondere dann auf, wenn die Aufgaben eine hohe kognitive Beanspruchung erforderten. Zusammengefasst deuten die Befunde darauf hin, dass die Reduktion der Hochgeschwindigkeitsaktivität bei mental ermüdeten Spieler:innen weniger auf physische Erschöpfung, sondern vielmehr auf die eingeschränkte kognitive Leistungsfähigkeit in komplexen Spielsituationen zurückzuführen ist (Coutinho et al., 2018; Staiano et al., 2023).

4.7.8 Sprung

Staiano et al. (2023) untersuchten den Einfluss mentaler Ermüdung, hervorgerufen durch kognitiv anspruchsvolle Aufgaben, auf die Sprungleistung von Athleten und kamen zu differenzierten Ergebnissen.

Demnach beeinträchtigt ME kurzfristige, maximale Kraftleistungen – wie einzelne Sprünge oder isolierte Kontraktionen – nicht signifikant. In der Studie zeigte sich kein Unterschied in der maximalen Sprunghöhe beim Countermovement Jump (CMJ), weder vor noch nach der mentalen Belastungsaufgabe, was mit früheren Untersuchungen übereinstimmt, die ebenfalls keine negativen Effekte auf Einzelsprünge nachweisen konnten. Anders verhält es sich bei wiederholten Sprungbelastungen: Im Repeated Jump Ability (RJA) Test, bestehend aus 12 maximalen Sprüngen mit kurzen Pausen von fünf Sekunden, führte ME zu einer signifikant reduzierten mittleren Sprunghöhe (–8 %) und einem deutlich erhöhten Ermüdungsindex (+58 %) im Vergleich zur Kontrollbedingung. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass mentale Ermüdung die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der Leistungsintensität bei wiederholten Sprüngen verringert.

Verantwortlich dafür sind vermutlich die gestörte neuromuskuläre Koordination, eine eingeschränkte Gleichgewichtsregulation und eine erhöhte subjektive Anstrengungswahrnehmung (RPE). Physiologische Parameter wie Herzfrequenz und Laktatwerte blieben hingegen unverändert, was darauf schließen lässt, dass die beobachteten Leistungseinbußen primär auf zentralnervöse und kognitive Prozesse zurückzuführen sind (Staiano et al., 2023).

4.8 Leistungsauswirkungen - kollektiv

Fußball, sowie einige andere Mannschaftssportarten, ist als Sportart zu verstehen, die sowohl physisch, als auch technisch sehr herausfordernd ist. Daher ist auch die kognitive Belastung, auf Grund der erhöhten Konzentration, die es bedarf um diese Aktivität auf einem hohen Niveau durchzuführen, ein bedeutender Punkt in Bezug auf die Erholung des Gehirns. Dieses benötigt nach einem Spiel in etwa 48 bis 72 Stunden um wieder vollständig erholt zu sein, abhängig von der Spielzeit der Spieler:innen (Nedelec 2012, Brownstein 2017). Somit macht vor allem der Spieltag einen großen Teil der mentalen Belastung für die Spieler:innen und folglich auch einen elementaren Teil der Trainingsperiodisierung aus (Akubat 2014).

Das Verständnis der Trainer:innen über die interne Reaktion ihrer Spieler:innen auf den externen Load über die Spielzeit hinweg, ist essentiell für etwaige Vorgehensweisen im Erholungsprozess ihres Teams (Barrett 2018).

Besonderen Einfluss auf die technischen, taktischen und physischen Anforderungen des Spiels an die Spieler:innen, haben die Position, der Spielstand, die Spielweise des Gegners und der Spielort. Die Veränderung der Leistung in Bezug auf die Spielposition, wird im folgenden Absatz beschrieben (Lagos-Penas 2012, Bradley 2013, Barrett 2018).

4.8.1 Veränderungen pro Position

Der moderne Fußball hat sich zunehmend von starren Positionsstrukturen entfernt, dennoch bleiben die positionsspezifischen Anforderungen ein zentraler Bestandteil der Trainings- und Spielanalyse. Spieler:innen nehmen während eines Spiels überwiegend bestimmte Rollen ein,

deren physische und kognitive Belastungsprofile sich in objektiven GPS-Daten und subjektiven Anstrengungswahrnehmungen widerspiegeln. Barrett et al. (2018) untersuchten in einer Studie mit 32 männlichen Premier-League-Spielern, inwiefern sich die wahrgenommene Beanspruchung nach Spielende in Abhängigkeit von der Position unterscheidet.

Dabei wurden differenzierte Ratings of Perceived Exertion (RPE) erfasst, die die Atembelastung (RPE-B), die muskuläre Beanspruchung der Beine (RPE-L) und die technische bzw. kognitive Belastung (RPE-T) abbilden. Die Ergebnisse zeigten, dass insbesondere Außenverteidiger in allen drei Dimensionen die höchsten Werte berichteten, gefolgt von zentralen Mittelfeldspielern. Dies verdeutlicht, dass diese Positionen sowohl physisch als auch kognitiv besonders fordernd sind.

Darüber hinaus stellte die Studie fest, dass die RPE-T-Werte bei allen Positionen in Spielen gegen Gegner aus der oberen Tabellenhälfte signifikant höher ausfielen als gegen Teams der unteren Ränge. Daraus lässt sich schließen, dass nicht nur die Position, sondern auch die Spielkontextfaktoren wie Gegnerstärke maßgeblich zur mentalen und körperlichen Belastung beitragen. Barrett et al. (2018) empfehlen daher, die Trainings- und Regenerationsplanung positionsspezifisch auszurichten und nach besonders anspruchsvollen Spielen gezielt mentale Erholungsstrategien in die Trainingssteuerung zu integrieren.

4.8.2 Veränderungen in der Formation

Frühere Studien zeigen, dass mentale Ermüdung die Fähigkeit von Fußballspieler:innen beeinträchtigt, relevante Umgebungsreize wahrzunehmen und ihr Verhalten entsprechend anzupassen (Boksem et al., 2006; Lorist et al., 2005). Diese Beeinträchtigung wirkt sich insbesondere auf die räumliche Orientierung und Positionierung auf dem Spielfeld aus.

Da die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit und Aufmerksamkeit unter mentaler Ermüdung sinken, treffen Spieler:innen häufiger suboptimale Entscheidungen hinsichtlich ihrer Bewegungen und Abstände zu Mitspieler:innen und Gegner:innen (Coutinho et al., 2017).

Eine Untersuchung von M. R. Smith et al. (2016) verdeutlichte, dass mental ermüdete Spieler:innen zwar eine größere Konstanz in ihren Abständen zueinander aufwiesen, die Synchronität ihrer Positionsänderungen jedoch deutlich abnahm.

Dies weist darauf hin, dass ME die Wahrnehmung und Integration verfügbarer Informationen stört und somit die kollektive Anpassungsfähigkeit innerhalb der Mannschaft reduziert. Coutinho et al. (2018) bestätigten diese Ergebnisse und fanden, dass mentale Ermüdung zwar geringe Auswirkungen auf physische Leistungsparameter zeigte, jedoch mit einer verringerten Regelmäßigkeit der Abstände zwischen Spieler:innen einherging. Insgesamt deuten diese Befunde darauf hin, dass mentale Ermüdung die taktische Kohärenz und die kollektive Dynamik innerhalb einer Mannschaft erheblich beeinträchtigen kann.

4.8.3 Veränderung der Leistung in Bezug auf den Gegner

Die Leistungsfähigkeit im Mannschaftssport, insbesondere im Fußball, hängt stark von der Wechselwirkung zwischen individuellen Handlungen, taktischen Aufgaben und den situativen Umweltbedingungen ab (Coutinho et al., 2018).

Mentale Ermüdung stört dieses Zusammenspiel, indem sie die Fähigkeit der Spieler:innen beeinträchtigt, relevante Informationen aus der Umgebung wahrzunehmen, zu verarbeiten und in angemessene Entscheidungen umzusetzen (Smith et al., 2016; Coutinho et al., 2017; Fortes et al., 2019). Dadurch werden sowohl die Entscheidungsfindung als auch das taktische Verhalten messbar beeinflusst. Feld- und Laborexperimente zeigen, dass die negativen Auswirkungen von ME auf physische und taktische Leistungsparameter in Spielsituationen, in denen nur ein Team ermüdet ist, abgeschwächt erscheinen (Smith et al., 2018; Coutinho et al., 2018). Diese Abschwächung lässt sich durch sogenannte Kopplungstendenzen erklären: Das Verhalten des nicht ermüdeten Teams zwingt das andere, sich in seinen Bewegungs- und Entscheidungsprozessen anzupassen. Wenn jedoch beide Mannschaften gleichermaßen mental ermüdet sind, entfällt dieser externe Steuerungsimpuls, was zu den niedrigsten Werten nahezu aller physischen Variablen führt (Coutinho et al., 2018). Auf taktischer Ebene zeigt sich ME in einer geringeren Teamdispersion und einer verminderten kollektiven Synchronisation, was auf eine gestörte Wahrnehmung von Handlungsoptionen und eine reduzierte Koordinationsfähigkeit hinweist (Fortes et al., 2019; Ding et al., 2024).

4.8.4 Veränderung des Spielstils

Ein wesentlicher Aspekt der Leistungsfähigkeit im Fußball betrifft die Frage, wie Mannschaften in unterschiedlichen Spielsituationen und Wettkampfphasen agieren. Neben physischen Faktoren spielen hierbei insbesondere mentale Einflüsse eine zentrale Rolle. Phänomene wie „choking under pressure“ – das Nachlassen der Leistung unter Druck – und im Gegensatz dazu die sogenannte „clutch performance“, also die Leistungssteigerung in entscheidenden Momenten, verdeutlichen den Einfluss psychischer Belastung auf die Spielleistung (Smoulder et al., 2023; Schweickle et al., 2022). Barrett et al. (2018) zeigte in seiner Untersuchung, dass Spieler:innen unabhängig von ihrer Position in Partien gegen Teams der oberen Tabellenhälfte höhere Werte in der technischen und kognitiven Beanspruchung (RPE-T) angaben als gegen schwächere Gegner. Dies deutet darauf hin, dass die mentale und emotionale Belastung in solchen Spielen signifikant zunimmt. Diese Effekte beschränken sich jedoch nicht nur auf einzelne Partien, sondern treten auch in spezifischen Phasen einer Saison auf. Eine Studie von Diaz-Garcia et al. (2021) mit 53 semiprofessionellen Fußballspielern zeigte, dass die wahrgenommene geistige und emotionale Anstrengung während der Play-off-Spiele deutlich höher lag als in der regulären Saison.

Diese Zunahme wird auf die über die Saison hinweg akkumulierte emotionale Belastung zurückgeführt, während sich die Werte an Trainingstagen zwischen den Saisonphasen kaum unterschieden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mentale Ermüdung und psychischer Druck saisonal variieren und entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben.

4.9 Zeitliche Dynamik

4.9.1 Auswirkungen auf die Trainingswoche

Der mentale Ermüdungszustand von Fußballspielern unterliegt sowohl innerhalb der Trainingswoche als auch zwischen einzelnen Spielen deutlichen Schwankungen. Diaz-Garcia et al. (2023) untersuchten dieses Muster, indem sie die wahrgenommene geistige Anstrengung (RPE) von Spielern nach allen Trainings- und Spieleinheiten einer gesamten Saison erfassten. Die Ergebnisse zeigten, dass die mentale Ermüdung am Tag nach dem Spiel (MD+1) am höchsten ausgeprägt war, während das Training am vierten Tag vor dem Spiel (MD-4) als das mental anspruchsvollste beschrieben wurde. Die Autoren vermuten, dass dieser Trainingstag bewusst so gestaltet wurde, um die größte kognitive und technische Belastung in einer Phase geringerer Ermüdung zu platzieren. Zudem ergab der Vergleich zwischen regulärer Saison und Play-offs deutliche Unterschiede: Am Trainingstag MD-1 (dem Vortag eines Spiels) berichteten die Spieler während der regulären Saison ein höheres Maß an mentaler Anstrengung als in der Endphase.

Diaz-Garcia et al. (2023) führen dies darauf zurück, dass Trainer in den entscheidenden Wochen der Saison gezielt Maßnahmen ergreifen, um die geistige Belastung zu reduzieren und optimale mentale Frische vor wichtigen Spielen sicherzustellen. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutung einer gezielten, phasenorientierten Steuerung mentaler Beanspruchung im Trainingsprozess.

4.9.2 Auswirkungen der Spielzeit

Diaz-Garcia et al. (2023) untersuchten in ihrer Studie auch, inwieweit die tatsächlich absolvierte Spielzeit den mentalen Ermüdungszustand von Fußballspielern beeinflusst. Dabei wurde die geistige, kognitive und emotionale Belastung im Wochenverlauf in Abhängigkeit von der Einsatzdauer analysiert.

Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede zwischen der regulären Saison und der Play-off-Phase. Spieler, die keine Einsatzminuten erhielten, wiesen in der Play-off-Phase am Tag vor dem Spiel (MD-1) signifikant geringere Werte der wahrgenommenen Anstrengung (RPE) auf als während der regulären Saison. Gleichzeitig veränderten sich bei dieser Gruppe die kognitiven Anforderungen:

Sie nahmen am MD-1 zu, während sie am Tag nach dem Spiel (MD+1) abfielen. Hinsichtlich der emotionalen Beanspruchung zeigte sich, dass Spieler ohne Einsatzzeit am MD+1 während der Play-offs höhere Werte angaben, während diese an MD-4 und MD-1 deutlich niedriger ausfielen. Zudem ergab sich, dass Akteure mit einer Einsatzzeit von weniger als 45 Minuten am Folgetag höhere RPE-Werte und eine stärkere kognitive Belastung berichteten als jene mit längerer Spielzeit. Spieler ohne Einsatz zeigten darüber hinaus insgesamt eine höhere emotionale Beanspruchung als ihre Mitspieler mit längerer Einsatzdauer.

Diese Befunde verdeutlichen, dass die gespielte Zeit ein zentraler Faktor im Verständnis mentaler Ermüdung ist und bei der Planung von Trainings- und Erholungsstrategien unbedingt berücksichtigt werden sollte (Diaz-Garcia et al. 2023).

4.10 Monitoring

4.10.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)

Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) ermöglichen die präzise Erfassung von Positions- und Zeitdaten auf der Grundlage satellitengestützter Signalübertragung. Das bekannteste System ist das Global Positioning System (GPS), das seit den 1970er Jahren verwendet wird und mittlerweile in der Sportwissenschaft als zentrales Messinstrument zur Erhebung von Lokomotions- und Belastungsdaten etabliert ist (White et al., 2022; Delves et al., 2022; Coutts & Duffield, 2010). GNSS-Geräte werden genutzt, um Bewegungsparameter wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Distanz zu erfassen, was insbesondere zur Analyse von Belastungsprofilen, zur Trainingssteuerung und zur Erfassung der externen Trainingslast von Athleten dient. Auf dem Markt existieren zahlreiche Anbieter, darunter Catapult, STATSports, Kinexon, Polar, QUS und JOHAN Sports.

In der sportwissenschaftlichen Forschung werden GPS-Systeme vor allem eingesetzt, um die körperliche Aktivität und Bewegungsanforderungen von Athleten objektiv zu quantifizieren – insbesondere in Studien zu mentaler Ermüdung im Mannschaftssport (Coutinho et al., 2017; Coutinho et al., 2018; Pilka et al., 2023).

In Untersuchungen, die den Einfluss von ME auf Fußballspieler analysieren, wurden GPS-Geräte mit Abtastraten zwischen 5 Hz und 15 Hz (z. B. SPI-PRO, GPSports) verwendet, um während SSG Positionsdaten, Beschleunigungen und Distanzen zu erfassen. Auf Basis dieser Daten wurden Parameter wie die Gesamtdistanz oder das Verhältnis von Distanzen in verschiedenen Geschwindigkeitszonen (z. B. High-Speed Distance Ratio) berechnet (Coutinho et al., 2018). Darüber hinaus dienten GPS-Daten der Untersuchung taktischer Verhaltensmuster wie der Bewegungssynchronisation und der kollektiven Dynamik (Coutinho et al., 2017).

Die Validität und Zuverlässigkeit von GPS-Systemen wurde in verschiedenen Studien überprüft. Coutts und Duffield (2010) zeigten, dass GPS-Geräte mit 1 Hz-Frequenz (SPI-10, SPI Elite, WiSPI) zuverlässige Ergebnisse bei der Messung von Gesamtdistanz, Hochgeschwindigkeitsläufen (HIR, VHIR) und Spitzengeschwindigkeiten liefern, wenngleich die Präzision bei sehr intensiven Bewegungen eingeschränkt ist.

Neuere Systeme mit höheren Abtastraten (10 Hz) gelten als deutlich genauer, insbesondere bei der Erfassung hochintensiver Laufaktivitäten und Maximalgeschwindigkeiten (Gualtieri et al., 2023).

GPS-Technologie wird heute nicht nur im Fußball, sondern auch in anderen Sportarten, wie dem Orientierungslauf, zur Bestimmung von Laufdistanz, Geschwindigkeit und Herzfrequenz eingesetzt (Lam et al., 2023).

Darüber hinaus kommt sie in der Belastungs- und Verletzungsprävention zum Einsatz, indem Bewegungsdaten während Training und Wettkampf zur Vorhersage von Verletzungsrisiken herangezogen werden (Pilka et al., 2023).

4.11 Definition der Beschleunigungszonen

Beschleunigungen stellen einen zentralen Indikator der externen Belastung (External Load) im Mannschaftssport dar und werden typischerweise mithilfe von GPS-Systemen erfasst (Harper et al., 2019). Sie quantifizieren die Intensität und Häufigkeit schneller Bewegungsänderungen und gelten als sensibler Parameter für die biomechanische Beanspruchung von Athlet:innen. Üblicherweise werden Beschleunigungen über Intensitätsschwellen in Metern pro Quadratsekunde (m/s^2) kategorisiert. Hochintensive Beschleunigungen werden dabei meist als Werte über 2,5 bis 3 m/s^2 definiert, während sehr hohe Intensitäten Schwellen über 3,5 m/s^2 umfassen (Harper et al., 2019).

Im Bereich der Bewegungsanalyse, insbesondere beim Sprint, werden Beschleunigungsstrategien durch kinematische Variablen wie Schrittlänge, Schrittfrequenz und deren Verhältnis charakterisiert, wobei die Leistung häufig über die normalisierte durchschnittliche horizontale externe Leistung (NAHEP) beschrieben wird (Wild et al., 2022). Aktuelle Forschung zeigt, dass mentale Ermüdung keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung in der linearen Beschleunigungsphase eines wiederholten Sprinttests (RSA) hat, jedoch die Leistung in komplexeren, richtungswechselnden Phasen deutlich beeinträchtigt (Staiano et al., 2023). Dies äußert sich in längeren Laufzeiten und einem größeren Leistungsabfall. Zudem scheint ME die Häufigkeit von Beschleunigungen in niedrigen Intensitätsbereichen zu reduzieren, was auf eine veränderte Bewegungsstrategie und eingeschränkte Anpassungsfähigkeit in kognitiv anspruchsvollen Spielsituationen hindeutet (Coutinho et al., 2017; Coutinho et al., 2018).

4.12 Player Load

Das Training im modernen Spitzensport ist zunehmend durch eine datenbasierte Steuerung und Analyse von Leistungsparametern gekennzeichnet (Clemente et al., 2019a). Besonders im Mannschaftssport spielt das GPS-Tracking eine zentrale Rolle bei der Erfassung und Bewertung der Trainings- und Wettkampfbelastung (Akenhead & Nassis, 2016).

Die auf dieser Grundlage abgeleitete Trainingslast (Training Load, TL) wird in zwei Hauptkomponenten unterteilt: die externe Trainingslast, welche die objektive physische Beanspruchung beschreibt, und die interne Trainingslast, die die individuellen physiologischen und psychologischen Reaktionen auf diese Belastung widerspiegelt (Jaspers et al., 2017).

Ein zentraler Bestandteil der externen Trainingslast ist der Player Load, der als integratives Maß für die mechanische Beanspruchung von Athlet:innen gilt. Er basiert auf der kontinuierlichen Messung von Beschleunigungsänderungen in drei Raumrichtungen – vorwärts–rückwärts, lateral und vertikal – mittels inertialer Messeinheiten (IMUs), die in modernen GPS-Systemen integriert sind (Boyd, Ball & Aughey, 2011). Mathematisch wird der Player Load berechnet, indem die quadratische Summe der Beschleunigungsdifferenzen in allen drei Achsen über die Zeit summiert und anschließend skaliert wird:

$$PL = \sqrt{\sum (\Delta\alpha_x)^2 + (\Delta\alpha_y)^2 + (\Delta\alpha_z)^2} / 100$$

(Boyd et al., 2011).

Dieser Kennwert bildet die Summe sämtlicher dynamischer Bewegungen – darunter Beschleunigungen, Abbremsen, Sprünge und Richtungswechsel – ab und ermöglicht somit eine präzise Einschätzung der mechanischen Gesamtbelastung während Training oder Wettkampf (Barrett et al., 2014). Im Gegensatz zu reinen Distanz- oder Geschwindigkeitsdaten erfasst der Player Load auch multidimensionale Bewegungen und liefert damit ein umfassenderes Bild der physischen Beanspruchung (Aughey, 2011). In der Trainingssteuerung wird die Gesamtbelastung eines Athleten als Zusammenspiel physischer, technischer und kognitiver Anforderungen verstanden (Kölling et al., 2019; Hostrup & Bangsbo, 2023; Diaz-Garcia et al., 2023). Die externe Last, gemessen über GPS-Technologie, beinhaltet insbesondere hochintensive Beschleunigungen und Verzögerungen, die als zentrale Indikatoren biomechanischer Belastung gelten (Harper et al., 2019).

Ein wesentlicher Anwendungsbereich des Player Load liegt in der Berechnung des Acute:Chronic Workload Ratio (ACWR), das das Verhältnis kurzfristiger zu langfristiger Belastung beschreibt und zur Prävention von Überlastungs- und Verletzungsrisiken herangezogen wird (Barrett et al., 2018; Hostrup & Bangsbo, 2023; Pilka et al., 2023). Die interne Last hingegen wird häufig über subjektive Ratings der wahrgenommenen Anstrengung (dRPE) erfasst und spiegelt die psychophysiologische Beanspruchung wider (Barrett et al., 2018). Eine ausgewogene Trainingsplanung, die beide Komponenten berücksichtigt, ist entscheidend, um Über- und Unterbelastungen zu vermeiden (Pilka et al., 2023).

4.13 Möglichkeiten ME vorzubeugen

4.13.1 Trainierbarkeit der mentalen Belastungstoleranz

Das Brain Endurance Training (BET) stellt eine innovative Trainingsform dar, die physische und kognitive Belastung gezielt innerhalb einer Trainingseinheit kombiniert, um die Widerstandsfähigkeit gegenüber mentaler Ermüdung zu erhöhen (Staiano et al., 2022; Roelands & Bogataj, 2024). Je nach Zeitpunkt der kognitiven Belastung wird zwischen Pre-BET (vor dem Training), Intermixed-BET (während des Trainings) und Post-BET (nach dem Training) unterschieden. Zentrales Ziel dieser Methode ist es, Athlet:innen durch wiederholte Exposition gegenüber kognitiven Stressoren an mentale Ermüdung zu adaptieren und dadurch sowohl die physische Leistungsfähigkeit als auch die kognitive Stabilität im Wettkampf zu verbessern.

Mentale Ermüdung, die aus langanhaltender, anspruchsvoller geistiger Aktivität resultiert, beeinträchtigt nachweislich Ausdauerleistung, Entscheidungsqualität und technische Präzision. BET wirkt diesem Prozess entgegen, indem es gezielt die kognitive Belastung innerhalb des Trainings erhöht und so adaptive Veränderungen in zentralen Gehirnregionen, insbesondere im präfrontalen und anterioren cingulären Kortex, anstößt. Diese Areale sind maßgeblich an kognitiver Kontrolle, Aufmerksamkeitsregulation und der Steuerung der Anstrengungswahrnehmung beteiligt.

Die regelmäßige Anwendung von BET führt zu einer verbesserten Effizienz und Belastungstoleranz dieser neuronalen Systeme, was sich in einer geringeren wahrgenommenen Anstrengung und einer höheren Leistungsstabilität unter Ermüdung äußert. Empirische Befunde zeigen, dass insbesondere Post-BET-Protokolle die Ausdauerfähigkeit, psychomotorische Wachsamkeit und inhibitorische Kontrolle signifikant steigern können.

Bei professionellen Fußballspieler:innen führte diese Trainingsform zu einer messbaren Verbesserung physischer und kognitiver Parameter sowie einer erhöhten Multitasking-Leistung – Fähigkeiten, die im Hochleistungssport mit komplexen, schnellen Entscheidungssituationen von zentraler Bedeutung sind (Staiano et al., 2022; Roelands & Bogataj, 2024).

5 Methodik

5.1 Stichprobe

Alle Teilnehmer dieser Studie wurden vor Beginn der Untersuchung umfassend über die Zielsetzung, den Ablauf sowie mögliche Risiken informiert. Die Teilnahme erfolgte freiwillig, und alle Spieler unterzeichneten eine schriftliche Einverständniserklärung. Es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein Abbruch der Teilnahme jederzeit und ohne Angabe von Gründen möglich war, ohne dass den Teilnehmern daraus Nachteile entstanden. Sämtliche erhobenen Daten wurden anonymisiert und gemäß den geltenden Datenschutzrichtlinien (DSGVO) gespeichert. Die Verwendung der Daten erfolgte ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken, wobei eine Veröffentlichung der Ergebnisse nur in anonymisierter Form vorgesehen ist. Zusätzlich wurde vor Beginn der Datenerhebung eine ärztliche Untersuchung durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Probanden gesundheitlich in der Lage waren, an den durchgeführten Tests teilzunehmen.

Die gesamte Studie wurde von der Ethikkommission der Universität Wien genehmigt und entsprach den ethischen Richtlinien für sportwissenschaftliche Forschung.

An der Untersuchung nahmen insgesamt 20 männliche Fußballspieler eines Regionalligavereins der dritten österreichischen Liga teil. Zehn der Spieler gehörten der Kampfmannschaft, während die übrigen zehn der zweiten Mannschaft angehörten. Alle Probanden waren volljährig, gesund und verfügten über mehrere Jahre Erfahrung im leistungsorientierten Fußball. Durch diese homogene Stichprobe konnte eine vergleichsweise einheitliche Ausgangslage hinsichtlich Trainingsstand und sportlicher Belastung gewährleistet werden. Dennoch stellt die begrenzte Stichprobengröße eine wesentliche Einschränkung der Studie dar, da die Ergebnisse ausschließlich auf Spieler eines bestimmten Leistungsniveaus und Vereins beschränkt sind.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Spieler höherer Ligen oder auf den Profifußball ist daher nur eingeschränkt möglich. Insbesondere die spezifischen Rahmenbedingungen der Regionalliga, in der viele Spieler neben dem Fußball einer Berufstätigkeit nachgehen, unterscheiden sich deutlich vom professionellen Leistungsfußball. Diese Unterschiede wirken sich sowohl auf die Trainingsbelastung als auch auf die Regenerationsmöglichkeiten aus und erschweren einen direkten Vergleich. Darüber hinaus fanden die Tests unter kontrollierten, jedoch künstlichen Trainingsbedingungen statt, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Wettkampfsituationen mit höherem psychischem Druck und dynamischeren Anforderungen einschränken kann.

Ein weiterer limitierender Faktor betrifft die Erfassung der mentalen Ermüdung, die auf subjektiven Selbsteinschätzungen der Spieler basierte und somit anfällig für individuelle Wahrnehmungsverzerrungen ist. Zudem konnten nicht alle externen Einflussfaktoren wie Tagesform, psychische Verfassung, Schlafqualität oder Koffeinkonsum vollständig kontrolliert werden. Schließlich fehlte eine Langzeitbeobachtung, die Rückschlüsse auf langfristige Effekte mentaler Ermüdung erlaubt hätte. Zukünftige Studien sollten daher größere Stichproben, objektive Messmethoden und längere Untersuchungszeiträume einbeziehen, um die gewonnenen Erkenntnisse weiter zu vertiefen.

5.2 Studiendesign und Ablauf

Das Studiendesign folgt einem quantitativen, wiederholten Messansatz. Über einen Zeitraum von vier Wochen absolvierten die Spieler acht standardisierte Trainingseinheiten, die jeweils nach identischem Protokoll durchgeführt wurden. Jede Einheit bestand aus einem Small-Sided Game (SSG) im Format 4 vs. 4 über zwei Durchgänge von je zwei Minuten mit einer einminütigen Pause.

Vor Beginn jeder Einheit wurden die Spieler gebeten, ihre subjektiv empfundene mentale Ermüdung auf einer numerischen Ratingskala (NRS) von 1–10 anzugeben (Marcora et al. 2009 / Smith et al. 2016 / Van Cutsem et al. 2017).

Die Spieler wurden einzeln vor jeder Trainingseinheit befragt wie sie ihre mentale Ermüdung vor Trainingsstart einschätzen würden, wobei die Zahl „1“ als *mental nicht ermüdet* und die Zahl „10“ als *sehr mental ermüdet* beschrieben wurde. Nach Abgabe der subjektiven Einschätzung wurde nochmals nachgefragt, ob die angegebene Zahl auch tatsächlich dem Ermüdungszustand entspricht um eventuelle Missverständnisse zu verhindern. Die Erhebung der mentalen Ermüdung musste deswegen subjektiv durchgeführt werden, da die Spieler nur knapp vor Trainingsstart erschienen sind und daher eine objektive Testung, wie zum Beispiel mittels Stroop-Test, organisatorisch nicht möglich waren.

Zur Auswertung wurden diese Angaben in vier Kategorien zusammengefasst:

Kategorie 1: mental ermüdet (10/9/8)

Kategorie 2: eher mental ermüdet (7/6)

Kategorie 3: eher nicht mental ermüdet (5/4)

Kategorie 4: nicht mental ermüdet (3/2/1).

5.3 Datenerhebung

Die körperlichen Leistungsdaten wurden mit GPS-basierten Trackingsystemen der Firma QUS Tech (10 Hz) erfasst. Insgesamt wurden zehn GPS-Parameter berücksichtigt, darunter Beschleunigungszonen, Laufintensitäten, zurückgelegte Distanz und Dynamic Load. Die Rohdaten wurden aus der QUS-Performance-Software exportiert und in SPSS weiterverarbeitet.

5.4 Datenaufbereitung

Um zufällige Schwankungen einzelner Sessions zu reduzieren und die Analyse auf stabile Muster zu fokussieren, wurden die acht Trainingseinheiten pro Spieler innerhalb jeder Ermüdungskategorie gemittelt. Dadurch ergab sich für jeden Spieler pro GPS-Parameter maximal ein Wert je Kategorie. Spieler, die nicht in allen Kategorien vertreten waren, gingen mit den vorhandenen Mittelwerten in die Analyse ein (Tabachnick & Fidell, 2019).

5.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit IBM SPSS Statistics (Version 29, Armonk, NY, USA). Zunächst wurden deskriptive Statistiken berechnet, um die Stichprobe sowie die zentralen GPS-basierten Leistungsparameter zu charakterisieren. Hierzu wurden Mittelwerte, Standardabweichungen, Minimal- und Maximalwerte herangezogen.

Im nächsten Schritt wurde geprüft, ob die Voraussetzungen für parametrische Analyseverfahren erfüllt sind. Hierfür wurden sowohl formale Tests auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test, Kolmogorov-Smirnov-Test) als auch eine grafische Inspektion der Verteilungen (Histogramme, Q-Q-Plots) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass einzelne Variablen deutliche Abweichungen von der Normalverteilung aufwiesen. Da zudem die abhängige Variable „mentale Ermüdung“ ordinal skaliert war, wurden für die weiteren Analysen überwiegend nichtparametrische bzw. ordinale Verfahren gewählt.

Zur Untersuchung bivariater Zusammenhänge zwischen der mentalen Ermüdung und den GPS-basierten Beschleunigungsparametern wurden Spearman-Rho-Korrelationen berechnet. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere bei ordinalen Variablen oder bei Verletzung der Normalverteilungsannahme und erlaubt eine robuste Einschätzung monotoner Zusammenhänge (Field, 2018).

Zur weiterführenden Analyse der Vorhersagekraft der Beschleunigungsparameter hinsichtlich der mentalen Ermüdung wurde eine ordinale logistische Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei diente die mentale Ermüdung (vierstufige ordinale Variable) als abhängige Variable, während die relevanten Beschleunigungszonen als Prädiktoren in das Modell aufgenommen wurden. Die Modellgüte wurde anhand des Likelihood-Ratio-Tests, der Anpassungsgüte (Pearson-Chi-Quadrat, Abweichungsstatistik), verschiedener Pseudo-R²-Kennwerte (Cox & Snell, Nagelkerke, McFadden) sowie des Parallelitätstests zur Überprüfung der Proportional-Odds-Annahme beurteilt.

Das Signifikanzniveau wurde für alle Analysen auf $\alpha = .05$ festgelegt. Ergebnisse mit $p < .05$ wurden als statistisch signifikant interpretiert. Ergänzend wurden Effektgrößen und Modellparameter berichtet, um die praktische Relevanz der Befunde angemessen einordnen zu können (Girden, 1992; Lakens, 2013).

6 Ergebnisse

6.1 Deskriptive Statistik

Zur Beschreibung der Stichprobe sowie der erhobenen Variablen wurden deskriptive Statistiken berechnet. Im Folgenden werden Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD), Minimum (Min), Maximum (Max) sowie die Anzahl der gültigen Fälle (N) dargestellt (vgl. Tabelle 1).

Die Stichprobe bestand aus 20 männlichen Teilnehmern mit jeweils acht Testungen, was insgesamt N = 160 Messungen ergibt. Das Durchschnittsalter betrug M = 20,25 Jahre (SD = 3,01) der jüngste Spieler war 18 Jahre alt, der älteste 29 Jahre.

Die Daten liegen in Form eines Paneldatensatzes vor: Mehrere Spieler (SpielerID) wurden in mehreren Trainingseinheiten (Session) wiederholt gemessen. Neben einer Gruppierungsvariable (Ermüdungskategorie) wurden als zentrale Leistungsparameter Load, Distanz sowie die Zeitwerte der einzelnen Beschleunigungszonen (Z2, Z3, Z4, ... , Z8) erfasst (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2).

6.1.1 Beschleunigungszonen

	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
N Gültig	160	160	160	160	160	160	160
Fehlend	0	0	0	0	0	0	0
Mittelwert	0:00:02	0:00:34	0:00:25	0:00:21	0:00:36	0:00:02	0:00:00
Std.-Abweichung	0:00:02,14	0:00:07,42	0:00:06,16	0:00:06,54	0:00:08,498	0:00:02,50	0:00:00,39
Minimum	0:00:00	0:00:15	0:00:10	0:00:06	0:00:18	0:00:00	0:00:00
Maximum	0:00:12	0:00:56	0:00:41	0:00:39	0:00:58	0:00:11	0:00:02

Tabelle 1 - Deskriptive Statistik Beschleunigungszonen

Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Session

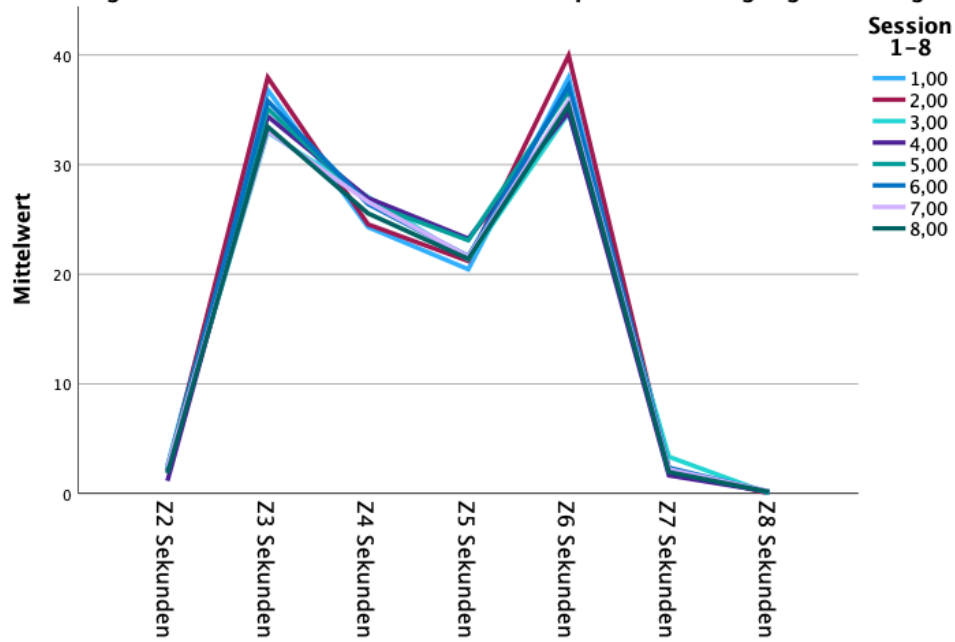


Abbildung 1 - Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Session

Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Ermüdungskategorien

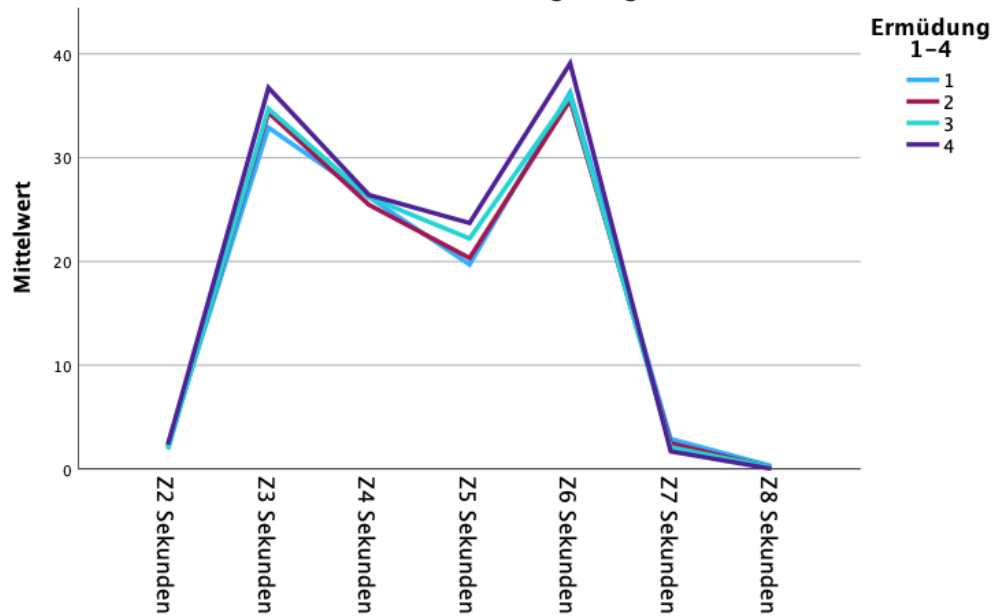


Abbildung 2 - Liniendiagramm der durchschnittlichen Sekunden pro Beschleunigungszone aufgeteilt nach Ermüdungskategorien

6.1.2 Player Load und Gelaufene Meter

Wie in Tabelle 2 zu erkennen, ergab sich für den Player Load ein Mittelwert von $M = 55,61$ ($SD = 9,08$) mit Werten zwischen 39,52 und 76,54. Die zurückgelegte Gesamtdistanz pro Minute lag im Mittel bei $M = 89,93$ m ($SD = 9,21$ m) bei einer Spannweite von 66 bis 109 m (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

Statistiken		Player Load	Gelaufene Meter
N	Gültig	160	160
	Fehlend	0	0
Mittelwert		55,621562	89,930000
Std.-Abweichung		9,0923728	9,2055386
Minimum		39,5300	66,0000
Maximum		76,5500	109,0000

Tabelle 2 - Deskriptive Statistik Player Load und Gelaufene Meter

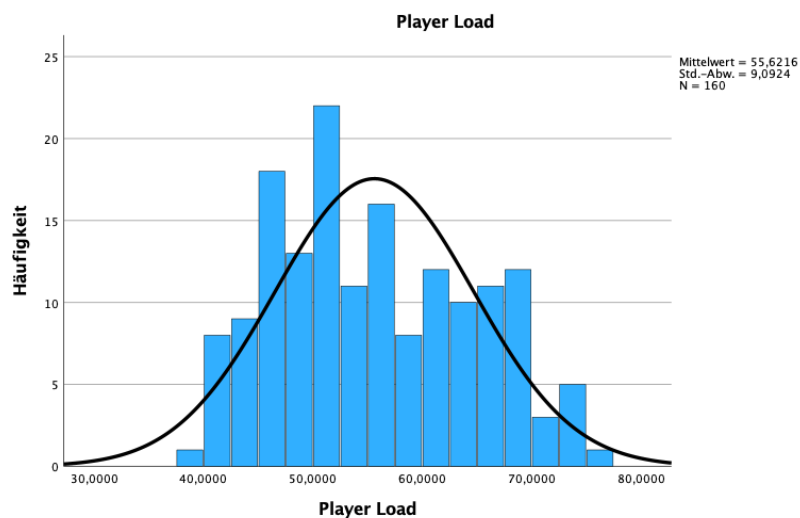


Abbildung 3 - Deskriptive Statistik Player Load

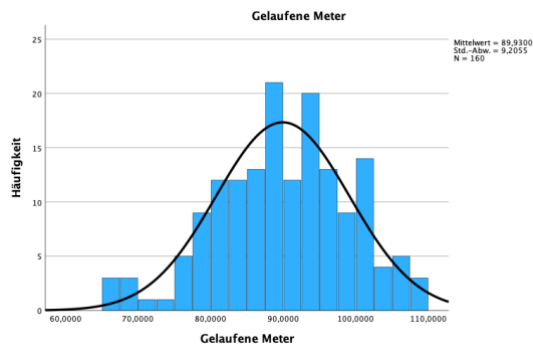


Abbildung 4 - Deskriptive Statistik Gelaufene Meter

6.1.3 Ermüdung

Für die Kategorie Ermüdung ergaben sich folgende, auf Einheiten und nicht auf einzelne Spieler bezogene, Werte. Als *mental ermüdet* (1) wurden zehn Einheiten (6,3 %) absolviert. 55 Einheiten (34,4 %) wurden in der Kategorie *eher mental ermüdet* (2), sowie 58 Einheiten (36,3 %) als *eher nicht mental ermüdet* (3) durchgeführt. Abschließend konnten 37 Einheiten (23,1 %) der Kategorie *nicht mental ermüdet* (4) zugeordnet werden (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 5).

Ermüdung 1-4

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig 1	10	6,3	6,3	6,3
2	55	34,4	34,4	40,6
3	58	36,3	36,3	76,9
4	37	23,1	23,1	100,0
G.	160	100,0	100,0	

Tabelle 3 - Deskriptive Statistik Ermüdung

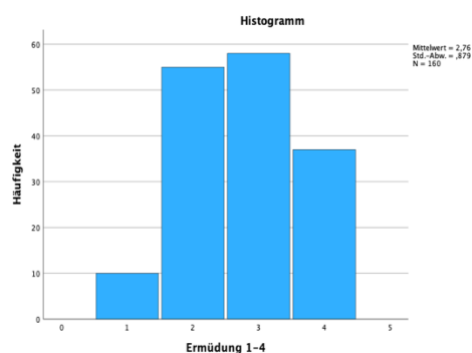


Abbildung 5 - Deskriptive Statistik Ermüdung

6.2 Statistische Testung

6.2.1 Beschleunigungsparameter und mentale Ermüdung

6.2.1.1 Tests auf Normalverteilung

Vor der Durchführung der Regressionsanalyse wurde geprüft, ob die Annahme der Normalverteilung erfüllt ist. Wie in Tabelle 4 zu sehen, deuten die grafische Inspektion sowie die Tests nach Shapiro-Wilk deuteten darauf hin, dass die Beschleunigungszone 3 ($p = 0,264$), Beschleunigungszone 4 ($p = 0,153$), Beschleunigungszone 5 ($p = 0,153$) und Beschleunigungszone 6 ($p = 0,153$) normalverteilt sind, während die Beschleunigungszonen 2, 7 und 8 (jeweils $p < 0,001$) nicht normalverteilt sind. Daher konnten für die Beschleunigungszonen 3-6 parametrische Verfahren wie die Spearman-Rho-Korrelationen und die ordinale logistische Regression angewendet werden.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Z2 Sekunden	,216	160	<,001	,810	160	<,001
Z3 Sekunden	,068	160	,064	,989	160	,264
Z4 Sekunden	,085	160	,007	,987	160	,153
Z5 Sekunden	,045	160	,200*	,992	160	,495
Z6 Sekunden	,063	160	,200*	,987	160	,138
Z7 Sekunden	,214	160	<,001	,811	160	<,001
Z8 Sekunden	,525	160	<,001	,330	160	<,001

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Tabelle 4 - Test auf Normalverteilung Beschleunigungszonen

6.2.1.2 Korrelationen

Zur Überprüfung erster Zusammenhänge wurden die Spearman-Rho-Korrelationen berechnet. Die Analyse der in Tabelle 5 aufgeführten Parameter ergibt, dass die Beschleunigungszone 5 signifikante Zusammenhänge mit der Ermüdung aufwies ($p = 0,003$). Dabei zeigte sich, dass längere Verweilzeiten in diesen Zonen mit einem niedrigeren Ermüdungsgrad assoziiert waren, da die Korrelationskoeffizienten positiv waren ($=,233$) (vgl. Tabelle 5).

			Ermüdung 1-4	Z3	Z4	Z5	Z6
Spearman-Rho	Ermüdung 1-4	Korrelationskoeffizient	1,000	,149	,029	,233**	,133
		Sig. (2-seitig)	.	,060	,713	,003	,094
		N	160	160	160	160	160
	Z3	Korrelationskoeffizient	,149	1,000	-,374**	,014	,690**
		Sig. (2-seitig)	,060	.	<,001	,863	<,001
		N	160	160	160	160	160
	Z4	Korrelationskoeffizient	,029	-,374**	1,000	,331**	-,100
		Sig. (2-seitig)	,713	<,001	.	<,001	,209
		N	160	160	160	160	160
	Z5	Korrelationskoeffizient	,233**	,014	,331**	1,000	-,121
		Sig. (2-seitig)	,003	,863	<,001	.	,127
		N	160	160	160	160	160
	Z6	Korrelationskoeffizient	,133	,690**	-,100	-,121	1,000
		Sig. (2-seitig)	,094	<,001	,209	,127	.
		N	160	160	160	160	160

** . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Tabelle 5 - Korrelationen Ermüdung Beschleunigungszonen

6.2.1.3 Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Beschleunigungszonen)

Tabelle 6 zeigt die Modellanpassung einer ordinalen logistischen Regression, in der ein Nullmodell ohne Prädiktoren (Intercept-only-Modell) mit einem finalen Modell verglichen wurde, das die Zeiten in den Beschleunigungszonen als Prädiktoren der ordinal skalierten Ermüdungsvariable enthält. Der Vergleich der -2 -Log-Likelihood-Werte ergibt eine deutliche Verbesserung von 397,592 im Nullmodell auf 385,443 im finalen Modell.

Der zugehörige Chi-Quadrat-Wert beträgt 12,149 bei 4 Freiheitsgraden und ist statistisch signifikant ($p = ,016$). Damit tragen die einbezogenen Beschleunigungszonen signifikant zur Erklärung der abhängigen Variable bei, sodass das Modell einen bedeutsamen Beitrag zur Vorhersage der Ermüdungsausprägungen liefert.

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nur konstanter Term	397,592			
Final	385,443	12,149	4	,016

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 6 - Modellanpassung Beschleunigungszonen

6.2.1.4 Anpassungsgüte

Die Güte der Modellanpassung wurde mittels Pearson-Chi-Quadrat und Abweichungsstatistik überprüft. Beide Tests weisen nicht-signifikante Ergebnisse auf (Pearson: $p = ,388$; Abweichung: $p = ,999$) (vgl. Tabelle 7), was darauf hindeutet, dass das Modell die beobachteten Daten gut abbildet. Ein signifikanter Wert würde auf eine mangelnde Anpassung hindeuten; dies ist hier jedoch nicht der Fall. Damit bestehen keine Hinweise auf strukturelle Fehlanpassungen, und das Modell kann als insgesamt stimmig und hinreichend passend bewertet werden.

	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Pearson	478,066	470	,388
Abweichung	384,056	470	,999

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 7 - Anpassungsgüte Beschleunigungszonen

6.2.1.5 Pseudo R-Quadrat

Die Pseudo- R^2 -Kennwerte geben einen Überblick darüber, wie viel Varianz durch das Modell aufgeklärt wird. Tabelle 8 zeigt, dass die Werte bei Cox & Snell $R^2 = ,073$, Nagelkerke $R^2 = ,080$ und bei McFadden $R^2 = ,030$ liegen. Diese Kennzahlen weisen auf eine eher geringe erklärte Varianz hin, was in ordinalen logistischen Modellen und insbesondere in psychologischen sowie sportwissenschaftlichen Kontexten häufig zu beobachten ist.

Trotz des insgesamt kleinen Effekts zeigen die Werte, dass das Modell in der Lage ist, einen relevanten, wenn auch begrenzten Teil der Unterschiede zwischen den Antwortkategorien statistisch zu erfassen.

Cox und Snell	,073
Nagelkerke	,080
McFadden	,030

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 8 - Pseudo R-Quadrat Beschleunigungszonen

6.2.1.6 Parallelitätstest für Linien^a

Der Parallelitätstest prüft die zentrale Annahme des ordinalen Logit-Modells, wonach die Steigungskoeffizienten über alle Antwortkategorien hinweg konstant sind. Die Ergebnisse in Tabelle 9 zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen dem eingeschränkten Modell (Nullhypothese) und einem Modell mit frei variierenden Steigungen (Chi-Quadrat = 2,951; df = 8; p = ,937). Damit wird die Nullhypothese nicht verworfen, und die Proportional-Odds-Annahme bleibt erfüllt. Das ordinale logistische Modell ist somit für die vorliegenden Daten angemessen und kann ohne Verletzung grundlegender Modellvoraussetzungen interpretiert werden.

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nullhypothese	385,443			
Allgemein	382,492	2,951	8	,937

Die Nullhypothese gibt an, dass die Lageparameter (Steigungskoeffizienten) über die Antwortkategorien übereinstimmen.

a. Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 9 - Parallelitätstest für Linien Beschleunigungszonen

Zur Prüfung von Hypothese 1 wurde der Zusammenhang zwischen mentaler Ermüdung und den Beschleunigungsparametern analysiert. Die Spearman-Korrelation zeigte, dass ausschließlich Beschleunigung 5 signifikant positiv mit der mentalen Ermüdung zusammenhing ($\rho = .233$, $p = .003$), während die übrigen Zonen keine bedeutsamen Zusammenhänge aufwiesen.

Dieses Ergebnis wurde durch die ordinale logistische Regression bestätigt: Das Gesamtmodell erklärte einen signifikanten Anteil der Varianz der Ermüdungskategorien ($\chi^2(4) = 12.149$, $p = .016$), wobei insbesondere Beschleunigung 5 als relevanter Prädiktor hervortrat. Da die Proportional-Odds-Annahme erfüllt war ($p = .937$), ist das Modell als stabil einzustufen. Insgesamt stützen die Befunde Hypothese 1 in der Weise, dass höhere Werte in Beschleunigungszone 5 mit wenig ausgeprägter mentaler Ermüdung einhergehen. Somit konnte Hypothese 1 bestätigt werden.

6.2.2 Player Load

6.2.2.1 Tests auf Normalverteilung

Die Tests auf Normalverteilung fielen bei einer Stichprobengröße von $N = 160$ teilweise signifikant aus (vgl. Tabelle 10). Da Normalverteilungstests bei großen Stichproben bereits auf sehr kleine Abweichungen empfindlich reagieren, wurden ergänzend die Residuen grafisch (Histogramm, Q-Q-Plot) überprüft. Die grafische Inspektion zeigte keine substantziellen Abweichungen von der Normalverteilung (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7). Da der formale Test dennoch signifikante Abweichungen ergab, wurde für die Korrelationsanalyse die Spearman-Rho-Korrelation verwendet, um der verletzten Normalverteilungsannahme gerecht zu werden.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Player Load	,088	160	,004	,965	160	<,001

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Tabelle 10 - Test auf Normalverteilung Player Load

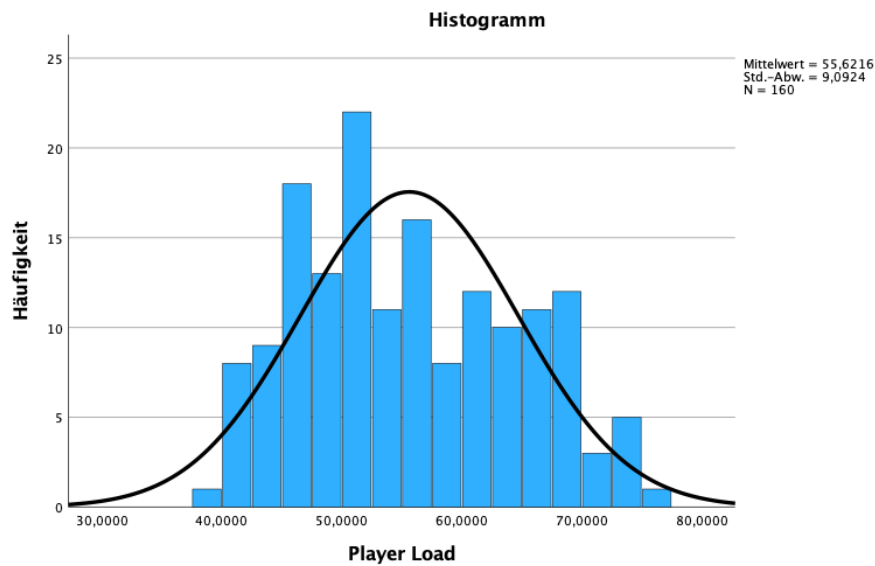


Abbildung 6 - Histogramm Player Load

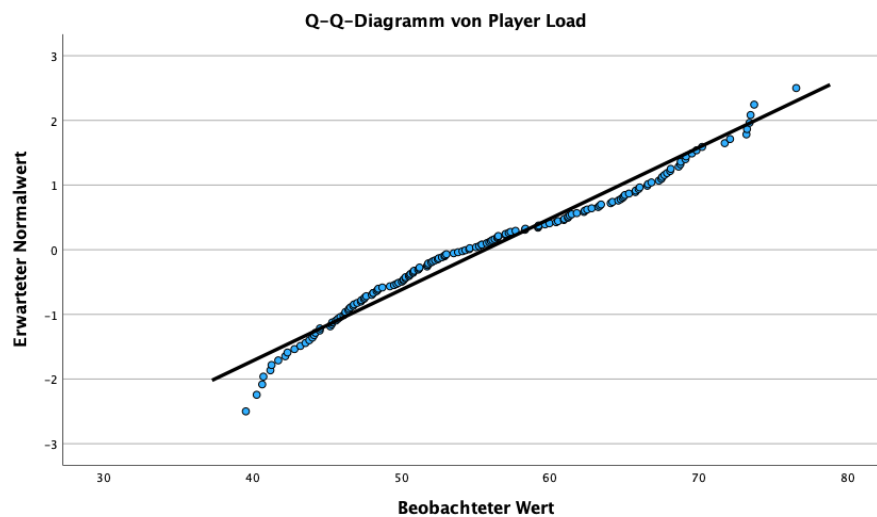


Abbildung 7 – Q-Q Diagramm Player Load

6.2.2.2 Korrelationen

Zur Überprüfung erster Zusammenhänge wurden die Spearman-Rho-Korrelationen berechnet, da die Daten nicht normalverteilt sind. Tabelle 11 verdeutlicht, dass der Player Load signifikante Zusammenhänge mit der Ermüdung aufweist ($p < 0,001$). Dabei zeigte sich, dass ein niedrigerer Ermüdungswert mit höheren Player Load Werten korreliert ($=,287$).

		Ermüdung 1-4		Player Load
Spearman-Rho	Ermüdung 1-4	Korrelationskoeffizient	1,000	,287**
		Sig. (2-seitig)	.	<,001
		N	160	160
	Player Load	Korrelationskoeffizient	,287**	1,000
		Sig. (2-seitig)	<,001	.
		N	160	160

** . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Tabelle 11 - Korrelationen Ermüdung Player Load

6.2.2.3 Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Player Load)

Die ordinale logistische Regression zeigte eine signifikante Verbesserung des Modells mit Player Load als Prädiktor gegenüber einem Nullmodell mit ausschließlich konstantem Term (Intercept-only-Modell). Tabelle 12 zeigt den Vergleich der Modellfit-Indizes, wobei sich eine signifikante Reduktion der -2-Log-Likelihood von 397,592 im Nullmodell auf 385,806 im finalen Modell ergab ($\Delta = 11,785$; $df = 1$; $p < .001$). Dies weist darauf hin, dass der Player Load einen signifikanten Beitrag zur Vorhersage der ordinalen Ermüdungskategorien leistet. Das Finalmodell ist dem Nullmodell damit statistisch eindeutig überlegen.

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nur konstanter Term	397,592			
Final	385,806	11,785	1	<,001

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 12 - Modellanpassung Player Load

6.2.2.4 Anpassungsgüte und Pseudo R-Quadrat

Die in Tabelle 13 abgebildeten Güteparameter deuten darauf hin, dass das Modell die beobachteten Daten adäquat abbildet. Sowohl der Pearson-Test ($\chi^2(467) = 458.306$; $p = .604$) als auch die Deviance ($\chi^2(467) = 384.420$; $p = .998$) zeigen keine signifikanten Abweichungen zwischen beobachteten und vorhergesagten Werten, wodurch eine gute Modellpassung gegeben ist. Die Pseudo- R^2 -Werte (Cox & Snell = .071; Nagelkerke = .077;

McFadden = .030) liegen im erwartbaren Bereich ordinaler Regressionsmodelle und zeigen einen kleinen, aber bedeutsamen Erklärungsanteil des Prädiktors (vgl. Tabelle 14).

	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Pearson	458,306	467	,604
Abweichung	384,420	467	,998

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 13 - Anpassungsgüte Player Load

Cox und Snell	,071
Nagelkerke	,077
McFadden	,030

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 14 - Pseudo R-Quadrat Player Load

6.2.2.5 Parameterschätzer

Der Prädiktor *Load* erwies sich als signifikanter positiver Einflussfaktor auf die Wahrscheinlichkeit, höheren Ermüdungskategorien zugeordnet zu werden ($\beta = .055$; $SE = .017$; $Wald = 11.093$; $p < .001$) (vgl. Tabelle 15). Mit zunehmender Trainingsbelastung steigt somit die Wahrscheinlichkeit, dass Athlet:innen stärkere Ermüdungsgrade berichten. Die Schwellenparameter für Kategorie 2 ($p = .004$) und Kategorie 3 ($p < .001$) sind signifikant, was eine sinnvolle Trennung der Antwortkategorien bestätigt. Der in Tabelle 16 präsentierte Test der Parallelitätsannahme ($\chi^2(2) = .953$; $p = .621$) war nicht signifikant, womit die Annahme proportionaler Logits erfüllt ist und das ordinale Logitmodell angemessen bleibt.

			Standard		Freiheits		Konfidenz- intervall 95%	
		Schätzer	Fehler	Wald	grade	Sig.	Unter- grenze	Ober- grenze
Schwelle	[Kategorie = 1]	,262	,938	,078	1	,780	-1,577	2,100
	[Kategorie = 2]	2,668	,927	8,284	1	,004	,851	4,484
	[Kategorie = 3]	4,336	,969	20,001	1	<,001	2,435	6,236
Lage	Load	,055	,017	11,093	1	<,001	,023	,088

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 15 - Parameterschätzer Player Load

6.2.2.6 Parallelitätstest für Linien^a

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nullhypothese	385,806			
Allgemein	384,853	,953	2	,621

Die Nullhypothese gibt an, dass die Lageparameter (Steigungskoeffizienten) über die Antwortkategorien übereinstimmen.

a. Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 16 - Parallelitätstest für Linien Player Load

Zur Prüfung der Hypothese wurde eine ordinale logistische Regression durchgeführt. Das Modell zeigte eine signifikante Verbesserung gegenüber dem Nullmodell ($\chi^2(1) = 11.785$; $p < .001$), und die Gütekriterien wiesen auf eine gute Modellpassung hin (Pearson $p = .604$; Deviance $p = .998$). Auch die Parallelitätsannahme war erfüllt ($p = .621$), sodass das Modell als geeignet gilt.

Der Prädiktor Player Load erwies sich als statistisch signifikanter Einflussfaktor ($\beta = .055$; $p < .001$). Eine höhere Player Load erhöht somit die Wahrscheinlichkeit, höheren Ermüdungskategorien zugeordnet zu werden. Hypothese 2 kann daher bestätigt werden: Mentale Ermüdung steigt signifikant mit zunehmender Player Load.

6.2.3 Gelaufene Meter (pro Minute)

6.2.3.1 Tests auf Normalverteilung

Die Überprüfung der Normalverteilungsannahme für die Variable *Gelaufene Meter* ergab sowohl nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test ($p = 0,200$) als auch nach dem Shapiro-Wilk-Test ($p = 0,162$) keine signifikanten Abweichungen, weshalb die Normalverteilung bestätigt ist (vgl. Tabelle 17). Ergänzend wurde eine grafische Inspektion der Residuen (Histogramm, Q-Q-Plot) durchgeführt (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Diese zeigte keine gravierenden Abweichungen, sodass von einer hinreichenden Normalverteilung ausgegangen werden kann.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Gelaufene Meter	,042	160	,200*	,987	160	,162

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Tabelle 17 - Test auf Normalverteilung Gelaufene Meter

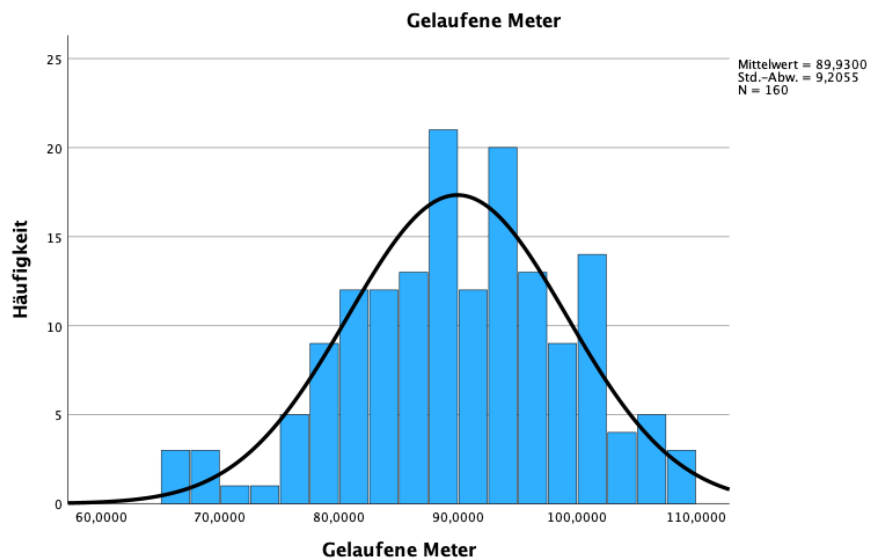


Abbildung 7 - Histogramm Gelaufene Meter

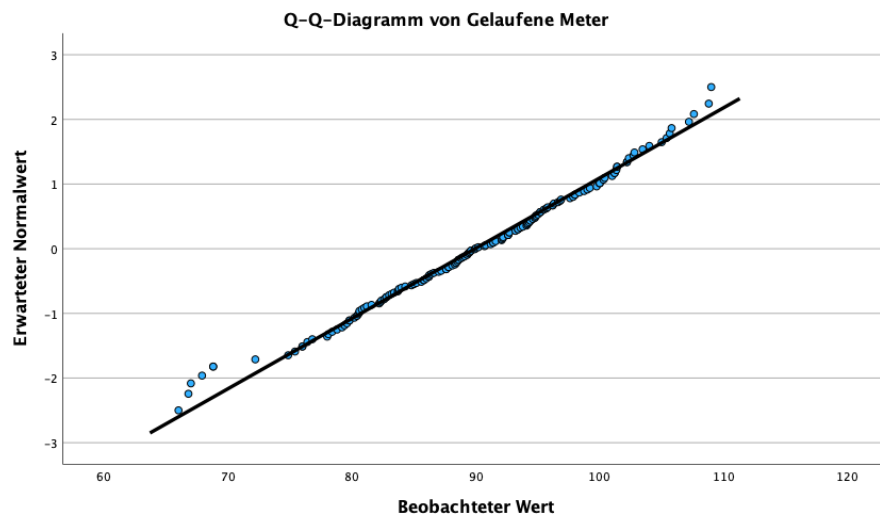


Abbildung 8 - Q-Q-Diagramm Gelaufene Meter

6.2.3.2 Korrelationen

Zur Überprüfung erster Zusammenhänge wurden, wie in Tabelle 18 ersichtlich, die Spearman-Rho-Korrelationen berechnet. Diese ergaben, dass die Gelaufenen Meter keine signifikanten Zusammenhänge mit der Ermüdung aufwies ($p = 0,174$).

			Ermüdung 1-4	Gelaufene Meter
Spearman-Rho	Ermüdung 1-4	Korrelationskoeffizient	1,000	,108
		Sig. (2-seitig)	.	,174
		N	160	160
	Gelaufene Meter	Korrelationskoeffizient	,108	1,000
		Sig. (2-seitig)	,174	.
		N	160	160

Tabelle 18 - Korrelationen Ermüdung Gelaufene Meter

6.2.3.3 Modellanpassung der ordinalen logistischen Regression (Gelaufene Meter)

Die ordinale logistische Regression zeigte keine signifikante Verbesserung des Modells mit gelaufener Distanz als Prädiktor gegenüber einem Nullmodell mit ausschließlich konstantem Term (Intercept-only-Modell). Die Reduktion der -2-Log-Likelihood von 372,403 im Nullmodell auf 369,488 im finalen Modell fiel gering aus und erreichte keine statistische Signifikanz ($\Delta = 2,915$; $df = 1$; $p = .088$) (vgl. Tabelle 19).

Damit leistet die gelaufene Distanz keinen signifikanten Beitrag zur Vorhersage der ordinalen Ermüdungskategorien. Das Finalmodell ist dem Nullmodell folglich nicht überlegen, sodass die Distanz in diesem Zusammenhang nicht als relevanter Prädiktor mentaler Ermüdung interpretiert werden kann.

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nur konstanter Term	372,403			
Final	369,488	2,915	1	,088

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 19 - Modellanpassung Gelaufene Meter

6.2.3.4 Anpassungsgüte und Pseudo R-Quadrat

Die Güteparameter deuten trotz der fehlenden Vorhersagekraft auf eine formal angemessene Modellpassung hin. Tabelle 20 zeigt, dass sowohl der Pearson-Test ($\chi^2(395) = 402.111$; $p = .392$) als auch die Deviance ($\chi^2(395) = 344.064$; $p = .969$) keine signifikanten Abweichungen zwischen beobachteten und modellierten Werten aufweisen. Dennoch weisen die Pseudo- R^2 -Werte (Cox & Snell = .018; Nagelkerke = .020; McFadden = .007) auf eine sehr geringe erklärte Varianz hin (vgl. Tabelle 21). Der Einfluss der gelaufenen Distanz auf die mentale Ermüdung ist somit praktisch vernachlässigbar.

	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Pearson	402,111	395	,392
Abweichung	344,064	395	,969

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 20 - Anpassungsgüte Gelaufene Meter

Cox und Snell	,018
Nagelkerke	,020
McFadden	,007

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 21 - Pseudo R-Quadrat Gelaufene Meter

6.2.3.5 Parameterschätzer und Parallelitätstest für Linien^a

Wie in Tabelle 22 zu sehen, zeigt die gelaufene Distanz keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, höheren Ermüdungskategorien zugeordnet zu werden ($\beta = .027$; $SE = .016$; $Wald = 2.981$; $p = .084$). Das 95%-Konfidenzintervall ($-.004$ bis $.059$) umfasst den Wert 0, was die fehlende Relevanz des Parameters zusätzlich bestätigt. Signifikante Schwellenparameter liegen nur für Kategorie 3 ($p = .012$) vor, was jedoch keine Aussage über die Bedeutung des Prädiktors selbst erlaubt. Der Test der Parallelitätsannahme ($\chi^2(2) = 2.403$; $p = .301$) war nicht signifikant, womit die Annahme proportionaler Logits erfüllt ist und das Modell methodisch angemessen bleibt (vgl. Tabelle 23).

		Schätzer	Standard Fehler	Wald	Freiheitsgrade	Sig.	Konfidenzintervall 95%	
							Unter-grenze	Ober-grenze
Schwelle	[Kategorie = 1]	-,266	1,446	,034	1	,854	-3,101	2,568
	[Kategorie = 2]	2,076	1,437	2,088	1	,148	-,740	4,893
	[Kategorie = 3]	3,680	1,458	6,371	1	,012	,822	6,538
Lage	Distanz	,027	,016	2,981	1	,084	-,004	,059

Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 22 - Parameterschätzer Gelaufene Meter

Modell	-2 Log-Likelihood	Chi-Quadrat	Freiheitsgrade	Sig.
Nullhypothese	369,488			
Allgemein	367,084	2,403	2	,301

Die Nullhypothese gibt an, dass die Lageparameter (Steigungskoeffizienten) über die Antwortkategorien übereinstimmen.

a. Verknüpfungsfunktion: Logit.

Tabelle 23 - Parallelitätstest für Linien Gelaufene Meter

Hypothese 3 prüfte, ob mentale Ermüdung mit der gelaufenen Distanz zusammenhängt. Die Spearman-Rho-Korrelation zeigte keinen signifikanten Zusammenhang ($\rho = .108$, $p = .174$). Auch das ordinale Regressionsmodell ergab keine signifikante Vorhersagekraft ($\chi^2(1) = 2.915$, $p = .088$; $\beta = .027$, $p = .084$). Die Pseudo- R^2 -Werte waren sehr niedrig (Nagelkerke $R^2 = .020$).

Da die gelaufene Distanz keinen Einfluss auf die mentale Ermüdung hat, kann Hypothese 3 verworfen werden.

7 Diskussion und Conclusio

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, mentale Ermüdung im Fußball sowohl theoretisch als auch empirisch zu beleuchten und zu prüfen, inwieweit sich dieser psychobiologische Zustand mithilfe objektiver, GPS-basierter Leistungsparameter erfassen lässt. Ausgehend von der Definition mentaler Ermüdung als Zustand, der durch anhaltende kognitiv anspruchsvolle Tätigkeiten entsteht und die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigt (Boksem et al., 2005; Pageaux et al., 2014; Habay et al., 2021), wurde zunächst der aktuelle Forschungsstand aufgearbeitet. Im Mittelpunkt standen dabei die multidimensionale Natur mentaler Ermüdung, ihre neurophysiologischen und neurochemischen Mechanismen sowie ihre Auswirkungen auf technische, taktische, physische und emotionale Leistungsaspekte im Fußball (Smith et al., 2016; Van Cutsem et al., 2017; Lam et al., 2023; Sun et al., 2022).

Im empirischen Teil wurden 20 Spieler eines Regionalligavereins über mehrere Trainingseinheiten hinweg untersucht. Die Spieler gaben vor jedem Training ihr subjektives mentales Ermüdungsniveau auf einer NRS-Skala von 1 bis 10 an, das anschließend in vier Kategorien („mental ermüdet“ bis „nicht mental ermüdet“) überführt wurde.

Parallel dazu wurden verschiedene GPS-Parameter erhoben, insbesondere Beschleunigungszonen, Player Load und gelaufene Distanz. Ziel war es, drei zentrale Hypothesen zu prüfen: ob mentale Ermüdung (1) anhand der Beschleunigungsparameter, (2) anhand des Player Load und (3) anhand der gelaufenen Distanz erkennbar ist.

Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Bild. Im Hinblick auf die Beschleunigungsparameter konnte ein signifikanter Zusammenhang mit der subjektiv erfassten mentalen Ermüdung nachgewiesen werden, wobei insbesondere die Beschleunigungszone 5 als relevanter Prädiktor hervortrat. Auch der Player Load wies einen signifikanten Zusammenhang mit der Ermüdungskategorie auf: Höhere Player-Load-Werte traten bei Spieler:innen mit geringerer subjektiver mentaler Ermüdung auf. Die gelaufene Distanz hingegen stand in keinem signifikanten Zusammenhang mit der mentalen Ermüdung, sodass Hypothese 3 verworfen werden musste. Insgesamt erklären die Modelle nur einen kleinen Teil der Varianz, liefern jedoch dennoch wichtige Hinweise darauf, welche Parameter für das Monitoring mentaler Ermüdung im Fußball eher geeignet sind und welche nicht.

Auf Basis des Forschungsstands lässt sich diese Befundlage in mehrfacher Hinsicht einordnen. Der theoretische Rahmen der Arbeit verdeutlicht, dass mentale Ermüdung nicht nur eine kognitive, sondern auch eine physiologische und emotionale Dimension besitzt (Boksem et al., 2005; Marcora et al., 2009; Habay et al., 2021). Sie manifestiert sich sowohl subjektiv – etwa als „voller Kopf“, Motivationsverlust und wachsender Widerstand gegenüber weiterer Anstrengung (Meijman, 2000; Russell et al., 2019) – als auch objektiv, etwa durch veränderte EEG-Muster, eine Verschiebung der sympathovagalen Balance im Herz-Kreislauf-System oder veränderte Reaktionszeiten und Entscheidungsqualität (Chaudhuri et al., 2004; Boksem et al., 2005; Lee et al., 2022; Tran et al., 2020).

Im fußballspezifischen Kontext konnte frühere Forschung zeigen, dass mentale Ermüdung insbesondere die exekutiven Funktionen, die Wahrnehmung relevanter Umgebungsreize und die Entscheidungsqualität beeinträchtigt (Smith et al., 2016; Thompson et al., 2020; Fortes et al., 2019). Dies wirkt sich auf technische Fertigkeiten wie Passspiel, Dribbling und Zweikampfverhalten aus (Kölling et al., 2019; Trecroci et al., 2020; Sun et al., 2022). Die vorliegende Studie knüpft an diese Befunde an, indem sie zeigt, dass sich mentale Ermüdung zumindest teilweise auch im Bewegungsprofil der Spieler:innen widerspiegelt. Allerdings sind es nicht die einfach zu erfassenden, groben Volumenparameter wie die gelaufene Strecke, sondern feinere dynamische Kennwerte wie Beschleunigungen und Player Load, die sensible Anknüpfungspunkte bieten.

Die Tatsache, dass insbesondere die Beschleunigungszone 5 – also ein Bereich moderater positiver Beschleunigungen – einen signifikanten Zusammenhang mit der subjektiven Ermüdungskategorie zeigt, kann als Ausdruck veränderter Bewegungsstrategien mental ermüdeter Spieler:innen interpretiert werden. Mentale Ermüdung hat nachweislich Einfluss auf die Qualität von Entscheidungen, die Antizipation und die räumliche Orientierung (Coutinho et al., 2017; Smith et al., 2016). Spieler:innen, die mental frischer sind, scheinen eher in der Lage zu sein, stabilere Bewegungsmuster zu behalten und demnach auch weniger entbehrliche Richtungswechsel zu verhindern (Coutinho et al. 2018). Bei höherer mentaler Belastung wird das Bewegungsverhalten hingegen durch eine schlechtere Positionswahl und die damit einhergehenden kompensatorischen Bewegungen beeinflusst (Smith et al. 2016; Smith et al. 2018). Gleichzeitig erinnern die eher moderaten Effektstärken und die geringe erklärte Varianz daran, dass mentale Ermüdung nicht monokausal über einzelne GPS-Kennzahlen dargestellt werden kann, sondern Teil eines komplexen Gefüges aus kognitiven, physiologischen und emotionalen Faktoren ist.

Besonders interessant ist der Befund zum Parameter Player Load. In der Literatur wird der Player Load als integratives Maß zur Erfassung der gesamten mechanischen Belastung beschrieben, das Beschleunigungen, Abbremsen, Sprünge und Richtungswechsel in allen drei Raumachsen zusammenfasst (Boyd et al., 2011; Barrett et al., 2014; Aughey, 2011). Er wird häufig als Indikator hoher externer Belastung interpretiert und u. a. im Rahmen des Acute:Chronic Workload Ratio (ACWR) genutzt, um Überlastungsrisiken zu identifizieren (Barrett et al., 2018; Hostrup & Bangsbo, 2023; Pilka et al., 2023). Die Erwartung lag daher nahe, dass ein höherer Player Load mit einer höheren mentalen Ermüdung einhergeht. Das Gegenteil ist der Fall: In der vorliegenden Studie weisen Spieler, die sich als mental weniger ermüdet eingestuft haben, tendenziell höhere Player-Load-Werte auf.

Dieser Befund ist auf den ersten Blick kontraintuitiv, fügt sich bei genauerer Betrachtung jedoch durchaus in den bestehenden Forschungsstand. Studien zeigen, dass mentale Ermüdung zwar die subjektive Anstrengungswahrnehmung erhöht und komplexe, koordinativ anspruchsvolle Handlungen beeinträchtigt, jedoch nicht zwingend zu einem sofortigen Rückgang aller physischen Parameter führt (McMorris, 2020; Coutinho et al., 2018; Staiano et al., 2023).

Häufig sind es insbesondere hochintensive Aktionen mit Richtungswechseln oder technisch-taktisch anspruchsvolle Situationen, die unter mentaler Ermüdung leiden, während eher automatische Bewegungsformen weiterhin in ähnlichem Umfang ausgeführt werden (Coutinho et al., 2018; Staiano et al., 2023).

Vor diesem Hintergrund lässt sich der Player Load in dieser Arbeit eher als Indikator vorhandener „Leistungsbereitschaft“ und mentaler Frische interpretieren denn als reiner Ermüdungsmarker. Spieler:innen, die mental erholt sind, sind eher bereit und in der Lage, häufige Richtungswechsel, explosive Antritte, abrupte Stopps und Sprünge auszuführen – genau jene Bewegungen, die den Player Load in die Höhe treiben. Mental ermüdete Spieler:innen hingegen könnten dazu neigen, Risiko und Bewegungskomplexität zu reduzieren, defensiver zu agieren, weniger Tiefenläufe zu starten oder schlicht weniger aggressiv in Zweikämpfe zu gehen. Die externe mechanische Belastung sinkt nicht zwangsläufig auf allen Ebenen, doch die multidimensionale Bewegungsausprägung ist abgeschwächt. Insofern bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie indirekt die Befunde von Sun et al. (2022), Coutinho et al. (2018) und Smith et al. (2016), wonach mentale Ermüdung vor allem qualitativ anspruchsvolle Aspekte des Spiels beeinträchtigt, weniger jedoch simple Volumenindikatoren.

Der Befund zur gelaufenen Distanz fügt sich ebenfalls gut in dieses Bild ein. Zahlreiche Untersuchungen konnten zeigen, dass mentale Ermüdung zwar zu einer Reduktion hochintensiver Aktionen, zu veränderten räumlichen Mustern und zu geringerer kollektiver Synchronisation führt (Coutinho et al., 2017; Smith et al., 2016; Coutinho et al., 2018), die Gesamtdistanz aber häufig relativ stabil bleibt. Spieler:innen bewegen sich also nach wie vor viel, allerdings weniger effizient, weniger koordiniert und mit geringerer Qualität in ihren Entscheidungen. Die vorliegende Studie bestätigt diese Interpretation: Die gelaufene Distanz pro Minute zeigt keinen signifikanten Zusammenhang mit der mentalen Ermüdungskategorie. Distanz allein ist demnach ein zu grober Parameter, um mentale Ermüdung abzubilden. Aus trainingspraktischer Sicht bedeutet dies, dass Trainer:innen, die ausschließlich auf gelaufene Meter blicken, wichtige Informationen zu mentaler Leistungsfähigkeit und kognitiver Belastung ihrer Spieler:innen übersehen.

Für die Praxis der Trainingssteuerung und des Match-Load-Monitorings lassen sich aus diesen Ergebnissen mehrere Implikationen ableiten. Erstens wird deutlich, dass mentale Ermüdung ein eigenständiger Belastungsfaktor ist, der nicht zwangsläufig parallel zur physischen Ermüdung verläuft. Athlet:innen können sich „physisch fit, aber mental müde“ fühlen – oder umgekehrt.

Subjektive Ratings wie die verwendete NRS, RPE-Skalen oder spezifische Fragebögen zur mentalen Ermüdung bleiben daher unverzichtbare Bausteine eines umfassenden Monitorings (Borg, 1998; Marcora et al., 2009; Scherr et al., 2012). Die vorliegende Arbeit unterstützt die Empfehlung der Literatur, subjektive und objektive Verfahren stets zu kombinieren (Jaspers et al., 2017; Habay et al., 2021).

Zweitens legen die Ergebnisse nahe, dass Trainer:innen in der Praxis stärker auf dynamische GPS-Parameter wie Beschleunigungsprofile und Player Load achten sollten, wenn sie Hinweise auf mentale Ermüdung suchen. Ein unerwartet niedriger Player Load bei Spieler:innen, welche unter normalen Umständen sehr dynamisch agieren, kann ein Hinweis auf mentale Überlastung sein – insbesondere, wenn er mit hohen subjektiven Ermüdungsangaben, verringerter Konzentrationsfähigkeit oder Auffälligkeiten im Entscheidungsverhalten einhergeht. Ebenso können Verschiebungen in Verweilzeiten bestimmter Beschleunigungszonen auf veränderte Bewegungsstrategien hindeuten. Trainer:innen sollten deshalb nicht nur auf absolute Werte blicken, sondern Veränderungen im individuellen Verlauf interpretieren.

Drittens bestätigen die Ergebnisse und der Forschungsstand die wachsende Bedeutung der bewussten Einplanung mentaler Erholung in die Trainingsperiodisierung. Studien zeigen, dass Spieler:innen insbesondere nach Wettkämpfen 48 bis 72 Stunden benötigen, um sich mental zu regenerieren (Nédélec et al., 2012; Brownstein, 2017). Díaz-García et al. (2021) konnten darüber hinaus zeigen, dass die mentale Belastung sowohl über die Trainingswoche als auch über die Saison variiert und in Play-off-Phasen deutlich zunimmt. Trainer:innen sollten daher nicht nur physische Parameter wie Trainingsvolumen, Intensität und Regenerationszeiten planen, sondern auch kognitive Belastung, Videoanalysen, taktische Besprechungen und mediale Anforderungen berücksichtigen. Besonders anspruchsvolle, kognitiv fordernde Inhalte – etwa komplexe taktische Spielformen, Entscheidungsdrills oder Brain Endurance Training – sollten vorrangig in Phasen relativ niedriger mentaler Ermüdung stattfinden.

Viertens bieten die Befunde eine Grundlage für konkrete Trainingsinterventionen. Brain Endurance Training (BET) wurde in der Literatur als Ansatz beschrieben, um die Toleranz gegenüber mentaler Ermüdung gezielt zu erhöhen (Staiano et al., 2022; Roelands & Bogataj, 2024). Durch die Kombination von kognitiv anspruchsvollen Aufgaben mit physischer Belastung – entweder vor, während oder nach der Trainingseinheit – sollen Athlet:innen darin geschult werden, auch unter mentaler Ermüdung präzise Entscheidungen zu treffen und ihre Leistungsfähigkeit stabil zu halten.

Die Daten der vorliegenden Studie legen nahe, dass solche Konzepte im Fußballtraining sinnvoll eingesetzt werden können, sollten aber sorgfältig dosiert und mit Blick auf die Gesamtbelastung über Woche und Saison geplant werden. BET darf nicht als zusätzliche Belastung „on top“ missverstanden werden, sondern sollte in eine strategische Balance aus Belastung und Erholung eingebettet sein.

Fünftens unterstreicht die Arbeit die Notwendigkeit, unterschiedliche Belastungsdimensionen – physisch, technisch, taktisch und mental – im Monitoring zusammenzuführen. Die Literatur zeigt, dass Positionsanforderungen, Spielstil, Gegnerstärke, Spielstand und Spielort die technische und kognitive Beanspruchung maßgeblich beeinflussen (Barrett et al., 2018; Lagos-Peñas, 2012; Bradley, 2013). Außenverteidiger und zentrale Mittelfeldspieler:innen sind häufig höheren technischen und kognitiven Belastungen ausgesetzt, was sich in höheren RPE-T-Werten widerspiegelt (Barrett et al., 2018). Hinzu kommen emotionale Belastungsspitzen in Play-off-Phasen und bei entscheidenden Spielen, in denen Phänomene wie „choking under pressure“ oder „clutch performance“ auftreten können (Schweickle et al., 2022; Smoulder et al., 2023). Trainer:innen sollten diese Kontexteffekte bei der Interpretation von GPS-Daten und subjektiven Ratings berücksichtigen, um nicht vorschnell lineare Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu unterstellen.

Die vorliegende Arbeit hat – trotz wichtiger Beiträge – auch wesentliche Limitationen, die die Interpretation der Ergebnisse einrahmen. Da die Stichprobe relativ klein ist und sich auf einen Regionalligaverein begrenzt, kann die Übertragbarkeit auf höhere Leistungsniveaus nur eingeschränkt durchgeführt werden. Profispieler:innen sind häufig stärkeren kognitiven und emotionalen Belastungen ausgesetzt, etwa durch hohe Spieldichte, internationale Wettbewerbe und mediale Aufmerksamkeit (Nédélec et al., 2012; Diaz-Garcia et al., 2021). Es ist möglich, dass in diesen Populationen stärkere oder andere Zusammenhänge zwischen mentaler Ermüdung und GPS-Parametern zu finden wären. Zudem basiert die Erfassung mentaler Ermüdung ausschließlich auf einer subjektiven NRS, ohne objektive kognitive Tests wie Stroop- oder Go/No-Go-Aufgaben (McLeod, 1991; Narmashiri et al., 2023; Habay et al., 2021). Die Entscheidung hierfür war organisatorisch begründet, schränkt aber die Präzision der Operationalisierung ein. Auch externe Faktoren wie Schlaf, berufliche Belastungen, private Stressoren oder Koffeinkonsum wurden nicht systematisch kontrolliert, obwohl bekannt ist, dass sie die wahrgenommene mentale Ermüdung beeinflussen können (Chaudhuri et al., 2004; Porkka-Heiskanen, 1999).

Methodisch ist zudem hervorzuheben, dass die statistischen Modelle zwar signifikante Effekte zeigten, die erklärte Varianz jedoch gering blieb. Dies ist – wie in psychologischen und sportwissenschaftlichen Untersuchungen nicht unüblich – ein Hinweis darauf, dass mentale Ermüdung von vielen weiteren Faktoren beeinflusst wird, die im vorliegenden Design nicht berücksichtigt werden konnten. Die Ergebnisse sollten daher nicht als deterministische Vorhersageformeln verstanden werden, sondern als Indizien für sinnvolle

Monitoringparameter, die in der Praxis immer im Zusammenspiel mit weiteren Informationen interpretiert werden müssen.

Aus diesen Limitationen ergeben sich konkrete Perspektiven für zukünftige Forschung. Sinnvoll wäre zunächst die Replikation des Studiendesigns in größeren Stichproben und auf unterschiedlichen Leistungsniveaus – von Nachwuchsleistungszentren bis hin zur Profiligena. Ein besonderes Interesse könnte dabei dem Vergleich zwischen Profis und Amateurspieler:innen gelten, da sich Belastungsprofil, Regenerationsmöglichkeiten und Ressourcen zur mentalen Erholung deutlich unterscheiden. Darüber hinaus wäre es gewinnbringend, subjektive Ratings mit objektiven Indikatoren mentaler Ermüdung zu kombinieren, etwa EEG, fNIRS, Eye-Tracking oder HRV-basierte Marker (Habay et al., 2021; Schweizer et al., 2022; Lee et al., 2022; Kashevnik et al., 2024).

Ein solcher multimodaler Ansatz könnte dazu beitragen, die Sensitivität und Spezifität der Diagnose zu erhöhen.

Zudem erscheint es vielversprechend, GPS-Daten nicht nur in Form einzelner Kennzahlen zu betrachten, sondern komplexere Muster mittels Machine-Learning-Verfahren zu analysieren. Studien wie jene von Kashevnik et al. (2024) im Bereich Eye-Tracking zeigen, dass algorithmische Auswertungen hochdimensionaler Daten in der Lage sind, mentale Ermüdung mit hoher Genauigkeit zu klassifizieren. Übertragen auf lokomotorische Daten könnte dies bedeuten, dass nicht nur Player Load oder einzelne Beschleunigungszonen, sondern die Gesamtheit der Bewegungs- und Positionsdaten Hinweise auf Ermüdungszustände liefert. Hier eröffnet sich ein breites Feld für interdisziplinäre Kooperationen zwischen Sportwissenschaft, Informatik und angewandter KI.

Schließlich sollten zukünftige Studien stärker die langfristigen Konsequenzen mentaler Ermüdung in den Blick nehmen. Neben akuten Leistungseinbußen könnten chronisch erhöhte mentale Belastung und unzureichende Erholung die Verletzungsanfälligkeit, die Karrierezufriedenheit und die mentale Gesundheit von Athlet:innen beeinflussen (Hostrup & Bangsbo, 2023; Kölling et al., 2019).

In einer Zeit, in der Spielpläne dichter werden und Spieler:innen, Trainer:innen und Verbände zunehmend vor der Herausforderung stehen, zwischen maximaler Ausnutzung des sportlichen und wirtschaftlichen Potenzials und der Erhaltung von Gesundheit und Leistungsfähigkeit zu balancieren, kommt der Erforschung mentaler Ermüdung eine zentrale Rolle zu.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorliegende Arbeit einen Beitrag dazu leistet, mentale Ermüdung im Fußball nicht nur als subjektiv empfundene Belastung, sondern als messbare Größe zu verstehen, die sich in bestimmten lokomotorischen Parametern widerspiegelt. Auch wenn Distanzwerte sich als wenig geeignet erwiesen haben, liefern Beschleunigungsprofile und der Player Load wertvolle Hinweise auf den mentalen Zustand von Spieler:innen. Gleichzeitig wird deutlich, dass mentale Ermüdung nicht vollständig in Zahlen zu fassen ist und daher immer im Kontext subjektiver Wahrnehmungen, taktischer Anforderungen und individueller Lebensbedingungen interpretiert werden muss. Für Trainer:innen ergibt sich daraus eine klare Botschaft: Wer Leistung optimieren will, darf die mentale Dimension nicht nur mitdenken, sondern muss sie systematisch erfassen, steuern und trainieren – im Sinne einer modernen, ganzheitlichen Trainingspraxis, die Körper und Geist gleichermaßen berücksichtigt.

8 Literaturverzeichnis

Abbott W., Brownlee T., Naughton R., Clifford T., Page R., Harper L. (2020). Changes in perceptions of mental fatigue during a season in professional under-23 English premier league soccer players. *Research in Sports Medicine*, 28(4), 529–539. doi:[10.1080/15438627.2020.1784176](https://doi.org/10.1080/15438627.2020.1784176)

Akenhead R., Nassis G. P. (2016). Training load and player monitoring in high-level football: current practice and perceptions. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11, 587–593. doi:[10.1123/ijsp.2015-0331](https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0331)

Akubat I., Barrett S., Abt G. (2014). Integrating the internal and external training loads in soccer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9, 457–462. doi:[10.1123/ijsp.2012-0347](https://doi.org/10.1123/ijsp.2012-0347)

Alix-Fages, C., Jiménez-Martínez, P., Souza de Oliveira, D., Möck, S., Balsalobre-Fernández, C., Del Vecchio, A. (2023). Mental fatigue impairs physical performance but not the neural drive to the muscle: a preliminary analysis. *European Journal of Applied Physiology*, 123:1671–1684. doi:[10.1152/jappphysiol.91324.2008](https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008)

Badin O., Smith M., Conte D., Coutts A. (2016). Mental fatigue impairs technical performance in small-sided soccer games. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(8), 1100–1105. doi:[10.1123/ijsp.2015-0710](https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0710)

Barrett, S., Midgley, A., Lovell, R. (2014). PlayerLoad™: Reliability, Convergent Validity, and Influence of Unit Position During Treadmill Running. *International journal of sports physiology and performance*. 9, 6: 945–952. doi:[10.1123/ijsp.2013-0418](https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0418)

Barrett S., McLaren S., Spears I., Ward P., Weston M. (2018). The Influence of Playing Position and Contextual Factors on Soccer Players' Match Differential Ratings of Perceived Exertion: A Preliminary Investigation. *Sports*, 12, 6-13. doi:[10.3390/sports6010013](https://doi.org/10.3390/sports6010013)

Bate, A. (2024, November 19). Science of the half-time team talk: Carlo Ancelotti's Real Madrid among those consulting Minute9 in search of an edge. *Zugriff am 08. Januar 2026* unter <https://www.skysports.com/football/news/11095/13255275/science-of-the-half-time-team-talk-carlo-ancelotti-s-real-madrid-among-those-consulting-minute9-in-search-of-an-edge>

Bänsch, A. (2013). Grundansprüche an wissenschaftliche Arbeiten. De Gruyter Oldenbourg, 1-100.

Birenboim, A., Dijst, M., Scheepers, F., Poelman, M., Helbich, M. (2018). Wearables and location tracking technologies for mental-state sensing in outdoor environments. *The Professional Geographer*, 71(3), 449–461.

Birkobein, S. (2024, Juni 19). Insta-Druck wird zur Belastung auf dem Platz. Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://www.bild.de/sport/fussball/frauenfussball-mvt-insta-druck-wird-zur-belastung-auf-dem-platz-6671519d6e547665456f65b0>

Boksem M., Meijman T., Lorist M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107–16. doi:[10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011)

Borg, G. A. (1962). Physical performance and perceived exertion. Berlingska Boktryckeriet.

Boyd, L., Ball, K., Aughey, R. (2011). The Reliability of MinimaxX Accelerometers for Measuring Physical Activity in Australian Football. *International journal of sports physiology and performance*. 6, 311-21. doi:[10.1123/ijsp.6.3.311](https://doi.org/10.1123/ijsp.6.3.311)

Bös, K., Hänsel, F., Schott, N., & Feldhaus Verlag GmbH & Co. KG. (2020). Empirische Untersuchungen in der Sportwissenschaft : Planung - Auswertung - Statistik (3., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage). Feldhaus, Edition Czwalina.

Bradley P., Lago-Penas C., Rev E., Gomez Diaz A. (2013). The effect of high and low percentage ball possession on physical and technical profiles in English FA premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 31, 1261–1270. doi:[10.1080/02640414.2013.786185](https://doi.org/10.1080/02640414.2013.786185)

Brochhagen, J., Ackermann, N., Heinrich, L., Hoppe, M. (2022). GPS-Daten zur Detektion von muskulärer Ermüdung in den Sportspielen. *Leipziger Sportwissenschaftliche Beiträge*. 63, 1, 57-74. doi:[10.5771/0941-5270-2022-1-57](https://doi.org/10.5771/0941-5270-2022-1-57)

Brown D., Bray S. (2018). Effects of mental fatigue on physical endurance performance and muscle activation are attenuated by monetary incentives. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 39(6), 385–96. doi:[10.1123/jsep.2017-0187](https://doi.org/10.1123/jsep.2017-0187)

Brownsberger, J., Edwards, A., Crowther, R., & Cottrell, D. (2013). Impact of mental fatigue on self-paced exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 34, 1029– 1036. doi:[10.1055/s-0033-1343402](https://doi.org/10.1055/s-0033-1343402)

Brownstein C., Dent J., Parker P., Hicks K., Howatson G., Goodall S., Thomas K. (2017). Etiology and Recovery of Neuromuscular Fatigue following Competitive Soccer Match-Play. *Frontiers in Physiology*, 8, 831. doi:[10.3389/fphys.2017.00831](https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00831)

BVB-Coach: Belastung für Nationalspieler «kaum tragbar» (2024). Zugriff am 08. Januar 2026 unter https://www.welt.de/newsticker/dpa_nt/infoline_nt/sport_nt/article254832278/BVB-Coach-Belastung-fuer-Nationalspieler-kaum-tragbar.html

Chaudhuri A., O Behan P. (2004). Fatigue in neurological disorders. *The Lancet*, 363, 978-988. doi:[10.1016/S0140-6736\(04\)15794-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(04)15794-2)

Clemente F. M., Owen A., Serra-Olivares J., Nikolaidis P. T., Cornelis M., van der Linden I., et al. (2019a). Characterization of the weekly external load profile of professional soccer teams from Portugal and the Netherlands. *J. Hum. Kinet.* 27, 155– 164. doi:[10.2478/hukin-2018-0054](https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0054)

Coutinho D., Goncalves B., Travassos B., Wong D., Coutts A., Sampaio J. (2017). Mental fatigue and spatial references impair soccer players' physical and tactical performances. *Frontiers in Psychology*, 8: 1645. doi:[10.3389/fpsyg.2017.01645](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01645)

Coutinho D., Goncalves B., Wong D., Travassos B., Coutts A., Sampaio J. (2018). Exploring the effects of mental and muscular fatigue in soccer players' performance. *Human Movement Science*, 58(1), 287–96. doi:[10.1016/j.humov.2018.03.004](https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.03.004)

Coutts A., Duffield R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3, 133–135. doi:[10.1016/j.jsams.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.09.015)

Cunha R. (2016). How does adenosine control neuronal dysfunction and neurodegeneration? *Journal of Neurochemistry*, 139(6), 1019–55. doi:[10.1111/jnc.13724](https://doi.org/10.1111/jnc.13724)

Cutsem, J. van, Marcora, S. M., de Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The effects of mental fatigue on physical performance. A systematic review. *Sports Medicine*, 47, 1569–1588. doi:[10.1007/s40279-016-0672-0](https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0)

Delves, R., Duthie, G., Ball, K., Aughey, R. (2022). Applying common filtering processes to Global Navigation Satellite System-derived acceleration during team sport locomotion. *Journal of Sports Sciences*, 40:10, 1116-1126. doi:[10.1080/02640414.2022.2051332](https://doi.org/10.1080/02640414.2022.2051332)

Díaz-García, J., García-Calvo, T., López-Gajardo, M. A., Rubio-Morales, A., Parraca, J. A. (2023). Physical fatigue exacerbates the negative effects of mental fatigue on soccer performance in practitioners. *European Journal of Human Movement*, 50: 62-69. doi:[10.21134/eurjhm.2022.50.7](https://doi.org/10.21134/eurjhm.2022.50.7)

Ding, C., Soh, K., Sun, H., Roslan, S., Cao, S., Zhao, Y. (2024). Does mental fatigue affect performance in racket sports? A systematic review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16, 179. doi:[10.1186/s13102-024-00963-w](https://doi.org/10.1186/s13102-024-00963-w)

Dunwiddie T., Masino S. (2001). The role and regulation of adenosine in the central nervous system. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 31-55. doi:[10.1146/annurev.neuro.24.1.31](https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.31)

FIFA-Legende Wanchope Watson ermutigt Spieler, über psychische Gesundheit zu sprechen (2024). Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://inside.fifa.com/de/news/fifa-legende-wanchope-watson-ermutigt-spieler-ueber-psychische-gesundheit-zu>

Fortes, L.S., Lima-Junior, D., Nascimento-Júnior, J.R.A., Costa, E.C., Matta, M.O., Ferreira, M.E.C. (2019). Effect of exposure time to smartphone apps on passing decision-making in male soccer athletes. *Psychology of Sports & Exercise*. 44: 35-41. doi:[10.1016/j.psychsport.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2019.05.001)

Gjestvang C., Landro Olsen M., Mass Dalhaug E., Haakstad L. (2024). Rating of perceived exertion as a tool for managing exercise intensity during pregnancy: a scoping review. *BMJ Open*, 14, 086682, 1-10. doi:[10.1136/bmjopen-2024-086682](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-086682)

Gregson W., Drust B., Atkinson G., Di Salvo V. (2010). Match-to-match variability of high-speed activities in premier league soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 31, 237–242. doi:[10.1055/s-0030-1247546](https://doi.org/10.1055/s-0030-1247546)

Grillon C., Quispe-Escudero D., Mathur A., Ernst M. (2015). Mental fatigue impairs emotion regulation. *Emotion*, 15(3), 383–389. doi:[10.1037/emo0000058](https://doi.org/10.1037/emo0000058)

Gruener, M., Wild, K. (2018, April 2). Ex-Bayer über Mertesacker und Druck im Fußball. Zugriff am 08. Januar 2026 unter https://www.kicker.at/babbel_ich-war-froh-als-man-united-das-2-1-geschossen-hat-720724/artikel

Habay, J., Van Cutsem, J., Verschueren, J., De Bock, S., Proost, M., De Wachter, J., Roelands, B. (2021). Mental fatigue and sport-specific psychomotor performance: A systematic review. *Sports Medicine (Auckland)*, 51(7), 1527–1548. doi:[10.1007/s40279-021-01429-6](https://doi.org/10.1007/s40279-021-01429-6)

Habay, J., Proost, M., De Wachter, J., Díaz-García, J., De Pauw, K., Meeusen, R., Van Cutsem, J., Roelands, B. (2021). Mental Fatigue Associated Decrease in Table Tennis Performance: Is There an Electrophysiological Signature? *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 12906. doi:[10.3390/ijerph182412906](https://doi.org/10.3390/ijerph182412906)

Harper, D.J., Carling, C., Kiely, J. (2019). High-Intensity Acceleration and Deceleration Demands in Elite Team Sports Competitive Match Play: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Sports Medicine* 49:1923–1947. doi:[10.1007/s40279-019-01170-1](https://doi.org/10.1007/s40279-019-01170-1)

Ho-Jin L., Yongjung C., Hyundeok J., Jae Yeong J., Young-Eun J., Jin-Tae K. (2021). Comparative study of verbal rating scale and numerical rating scale to assess postoperative pain intensity in the post anesthesia care unit. A prospective observational cohort study. *Medicine*, 100, 1-6. doi:[10.1097/MD.00000000000024314](https://doi.org/10.1097/MD.00000000000024314)

Hostrup M., Bangsbo J. (2023). Performance Adaptations to Intensified Training in Top-Level Football. *Sports Medicine*, 53, 577–594. doi:[10.1007/s40279-022-01791-z](https://doi.org/10.1007/s40279-022-01791-z)

Jaspers A., Brink M. S., Probst S. G., Frencken W. G., Helsen W. F. (2017). Relationships between training load indicators and training outcomes in professional soccer. *Sports Med.* 47, 533–544. doi:[10.1007/s40279-016-0591-0](https://doi.org/10.1007/s40279-016-0591-0)

Jiang, Z., Hao, Y., Jin, N., Li, Y. (2022). A Systematic Review of the Relationship between Workload and Injury Risk of Professional Male Soccer Players. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 13237. doi:[10.3390/ijerph192013237](https://doi.org/10.3390/ijerph192013237)

Kahe, G. & Masoumi Ganjgah, F. (2018). MAKAN: A low-cost low-complexity local positioning system. *Navigation*, 66, 401–415. doi:[10.1002/navi.308](https://doi.org/10.1002/navi.308)

Kashevnik, A., Kovalenko, S., Mamonov, A., Hamoud, B., Bulygin, A., Kuznetsov, V., Shoshina, I., Brak, I., Kiselev, G. (2024). Intelligent Human Operator Mental Fatigue Assessment Method Based on Gaze Movement Monitoring. *Sensors* 2024, 24, 6805. doi:[10.3390/s24216805](https://doi.org/10.3390/s24216805)

Kelle, U. (2018). „Mixed Methods“ in der Evaluationsforschung – mit den Möglichkeiten und Beschränkungen quantitativer und qualitativer Methoden arbeiten. *Zeitschrift für Evaluation*, 17, 1, 25-52. doi:[10.1007/s11577-017-0451-4](https://doi.org/10.1007/s11577-017-0451-4)

Klewer, J. (2022). Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten: Von der Themenfindung bis zur Fertigstellung. doi:[10.1007/978-3-662-65234-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65234-3)

Klimesh W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29, 169 – 195. doi:[10.1016/s0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00056-3)

Knicker, A. J., Renshaw, I., Oldham, A. R. H., & Cairns, S. (2011). Interactive processes link the multiple symptoms of fatigue in sport competition. *Sports Medicine*, 41, 307– 328. doi:[10.2165/11586070-000000000-00000](https://doi.org/10.2165/11586070-000000000-00000)

Kölling S., Loch F., Kellmann M. (2019). Mentale Ermüdung und Erholung. *Sport in Kultur und Gesellschaft, Handbuch Sport und Sportwissenschaft*, 467-479. doi:[10.1007/978-3-662-53407-6_42](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53407-6_42)

Lago C., Casais L., Dominguez E., Sampaio J. (2010). The effects of situational variables on distance covered at various speeds in elite soccer. *European Journal of Sport Science*, 10, 103–109. doi:[10.1080/17461390903273994](https://doi.org/10.1080/17461390903273994)

Lagos-Penas C. (2012). The Role of Situational Variables in Analysing Physical Performance in Soccer. *Journal of Human Kinetics*, 35, 89–95. doi:[10.2478/v10078-012-0082-9](https://doi.org/10.2478/v10078-012-0082-9)

Lam, H. K. N., Sproule, J., Turner, A. P., Murgatroyd, P., Gristwood, G., Richards, H., & Phillips, S. M. (2023). International orienteering experts' consensus on the definition, development, cause, impact and methods to reduce mental fatigue in orienteering: A Delphi study. *Journal of Sports Sciences*, 40(23), 2595–2607. doi:[10.1080/02640414.2023.2177027](https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2177027)

Lee, K.F.A., Chan, E., Car, J., Gan, W.-S., Christopoulos, G. (2022). Lowering the Sampling Rate: Heart Rate Response during Cognitive Fatigue. *Biosensors* 2022, 12, 315. doi:[10.3390/bios12050315](https://doi.org/10.3390/bios12050315)

LiaBraaten B., Stolzmann S., Simpson P., et al. (2023). The Rating of Perceived Exertion-Pediatric (RPE-P) Scale: Preliminary Validation. *Children*, 10, 1906, 1-14. doi:[10.3390/children10121906](https://doi.org/10.3390/children10121906)

Linke, D., Link, D., Lames, M. (2020). Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems. *PLoS ONE* 15(3). doi:[10.1371/journal.pone.0230179](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230179)

Lorist M, Boksem M., Ridderinkhof K. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 199–205. doi:[10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018)

Luethi M., Friese M., Binder J., Boesiger P., Luechinger R., Rasch B. (2016). Motivational incentives lead to a strong increase in lateral prefrontal activity after self-control exertion. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11, 1618–26. doi:[10.1093/scan/nsw073](https://doi.org/10.1093/scan/nsw073)

MacLeod, Colin M. (1991). John Ridley Stroop: Creator of a landmark cognitive task. *Canadian Psychology / Psychologie canadienne*, Vol 32(3), 521-524. doi:[10.1037/h0079012](https://doi.org/10.1037/h0079012)

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106, 857–864. doi:[10.1152/jappphysiol.91324.2008](https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008)

Marques-Jimenez, D., Calleja-Gonzalez J., Iñaki A., Annez D., Nicolás T., (2017). Fatigue and Recovery in Soccer: Evidence and Challenges. *The Open Sports Sciences Journal*, 10, 3-12. doi:[10.2174/1875399X01710010051](https://doi.org/10.2174/1875399X01710010051)

Martin, K., Meeusen, R., Thompson, K.G., Keegan, R., Rattray, B. (2018). Fatigue Impairs Endurance Performance: A Physiological Explanation. *Sports Medicine*, 48: 2041–2051. doi:[10.1007/s40279-018-0946-9](https://doi.org/10.1007/s40279-018-0946-9)

McMorris, T., Barwood, M., Hale, B., Dicks, M., Corbett, J. (2018). Cognitive fatigue effects on physical performance: A systematic review and meta-analysis. *Physiology & Behavior*, 188, 103-107. doi:[10.1016/j.physbeh.2018.01.029](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.01.029)

McMorris, T. (2020). Cognitive Fatigue Effects on Physical Performance: The Role of Interoception. *Sports Medicine*, 50: 1703–1708. doi:[10.1007/s40279-020-01320-w](https://doi.org/10.1007/s40279-020-01320-w)

Meier C., Braksiek M., Gröben B. (2020). Semantische Differentiale zur Erfassung von Bewegungsqualität bei sportlichen Bewegungen. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 1, 179-184. doi:[10.1007/s12662-019-00605-1](https://doi.org/10.1007/s12662-019-00605-1)

Meijman, T. (2000). “The theory of the stop-emotion: on the functionality of fatigue,” in 2nd International Conference on Ergonomics and Safety for Global Business Quality and Production, eds D. Podgorski and W. Karwowski (Warsaw: Cent Inst Labour Project), 45–50.

Meyer, T., Ferrauti, A., Kellmann, M., Pfeiffer, M. (2016). Regenerationsmanagement im Spitzensport. REGman – Ergebnisse und Handlungsempfehlungen. Bundesinstitut für Sportwissenschaft, 13-17.

Moalla W., Fessi M., Makni E., Dellal A., Filetti C., Di Salvo V., Chamari K. (2017). Association of Physical and Technical Activities with Partial Match Status in a Soccer Professional Team. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1–22. doi:[10.1519/JSC.0000000000002033](https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002033)

Narmashiri, A.M, Hatami, J., Khosrowabadi, R., Sohrabi, A. (2023). The Role of Cognitive Control in Paranormal Beliefs: A Study Based on Performance in Go/No-go Task. *Basic and Clinical Neuroscience*, 14(3), 411-418. doi:[10.32598/bcn.2021.923.3](https://doi.org/10.32598/bcn.2021.923.3)

Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2012). Recovery in soccer. Part I–Post-match fatigue and time course of recovery. *Sports Medicine*, 42, 997– 1015. doi:[10.2165/11635270-000000000-00000](https://doi.org/10.2165/11635270-000000000-00000)

Neubauer, A.C., Fink A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 33, 1004–1023. doi:[10.1016/j.neubiorev.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.001)

Newsholme E., Blomstrand E. (1996). The plasma level of some amino acids and physical and mental fatigue. *Experientia*, 52(5), 413–415. doi:[10.1007/BF01919308](https://doi.org/10.1007/BF01919308)

Pageaux B., Lepers R., Dietz K., Marcora S. (2014). Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *European Journal of Applied Physiology*, 114(5), 1095–105. doi:[10.1007/s00421-014-2838-5](https://doi.org/10.1007/s00421-014-2838-5)

Piłka, T., Grzelak, B., Sadurska, A., Górecki, T., Dyczkowski, K. (2023). Predicting Injuries in Football Based on Data Collected from GPS-Based Wearable Sensors. *Sensors* 2023, 23, 1227. doi:[10.3390/s23031227](https://doi.org/10.3390/s23031227)

Porkka-Heiskanen T. (1999). Adenosine in sleep and wakefulness. *The Finnish Medical Society Duodecim, Ann Med*, 31, 125-129. doi:[10.3109/07853899908998788](https://doi.org/10.3109/07853899908998788)

Power, C., Fox, J., Dalbo, V., Scanlan, A. (2022). External and Internal Load Variables Encountered During Training and Games in Female Basketball Players According to Playing Level and Playing Position: A Systematic Review. *Sports Medicine – Open*, 8, 107. doi:[10.1186/s40798-022-00498-9](https://doi.org/10.1186/s40798-022-00498-9)

Roelands, B., Bogataj, Š. (2024). Optimizing Athletic Performance Through Brain Endurance Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 19, 973-974. doi:[10.1123/ijsp.2024-0278](https://doi.org/10.1123/ijsp.2024-0278)

Roesler, E., zur Kammer, K., Onnasch, L. (2023). Multidimensionale Fragebögen zur Erfassung der wahrgenommenen Robotermorphologie (RoMo) in der Mensch-Roboter-Interaktion. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*. doi:[10.1007/s41449-023-00383-5](https://doi.org/10.1007/s41449-023-00383-5)

Russel M., Rees G., Kingsley M. (2013). Technical demands of soccer match play in the English Championship. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27, 2869–2873. doi:[10.1519/JSC.0b013e318280cc13](https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318280cc13)

Russell, S., Jenkins, D., Rynne, S., Halson, S.L., Kelly, V. (2019). What is mental fatigue in elite sport? Perceptions from athletes and staff. *European Journal of Sport Science*, 19:10, 1367-1376. doi:[10.1080/17461391.2019.1618397](https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1618397)

Scammel T. (2015). Overview of Sleep: The Neurologic Processes of the Sleep-Wake Cycle. *The Journal of Clinical Psychiatry*, 76(5): e13. doi:[10.4088/JCP.14046tx1c](https://doi.org/10.4088/JCP.14046tx1c)

Scherr J., Wolfarth B., Christle J., Pressler A., Wagenpfeil S., Halle M. (2012). Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 113, 147–155. doi:[10.1007/s00421-012-2421-x](https://doi.org/10.1007/s00421-012-2421-x)

Schweickle M., Vella S., Swann C. (2022). Was it a clutch performance? A qualitative exploration of the definitional boundaries of clutch performance. *Psychology of Sport & Exercise*, 62, 1-9. doi:[10.1016/j.psychsport.2022.102238](https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2022.102238)

Schweizer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R. (2022). Detecting Soldiers' Fatigue Using Eye-Tracking Glasses: Practical Field Applications and Research Opportunities. *Military Medicine*, 187, 1330-1337. doi:[10.1093/milmed/usab509](https://doi.org/10.1093/milmed/usab509)

Singer, R., & Willimczik, K. (2002). *Sozialwissenschaftliche Forschungsmethoden in der Sportwissenschaft: Eine Einführung*. Czwalina.

Smith M., Coutts A., Merlini M., Deprez D., Lenoir M., Marcora S. (2016). Mental fatigue impairs soccer- specific physical and technical performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(2), 267–276. doi:[10.1249/MSS.0000000000000762](https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000762)

Smith, M. R., Marcora, S.M., Coutts, A.J. (2015). Mental Fatigue Impairs Intermittent Running Performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 47, No. 8, pp. 1682–1690, 2015. doi:[10.1249/MSS.0000000000000592](https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000592)

Smith, M., Thompson, C., Marcora, S., Skorski, S., Meyer, T., Coutts, A. (2018). Mental Fatigue and Soccer: Current Knowledge and Future Directions. *Sports Med* 48, 1525–1532. doi:[10.1007/s40279-018-0908-2](https://doi.org/10.1007/s40279-018-0908-2)

Smith M., Zeuwts L., Lenoir M., Hens N., De Jong L., Coutts A. (2016). Mental fatigue impairs soccer-specific decision-making skill. *Journal of Sports Sciences*, 34(14), 1297–1304. doi:[10.1080/02640414.2016.1156241](https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1156241)

Smoulder A., Marino P., Oby E., Snyder S., Miyata H., Pavlovsky N., Bishop W., Yu B., Chase S., Batista A. (2023). A neural basis of choking under pressure. *BioRxiv*, 16. doi:[10.1101/2023.04.16.537007](https://doi.org/10.1101/2023.04.16.537007)

Soylu, Y., Ramazanoglu, F., Arslan, E., Clemente, F.M. (2022). Effects of mental fatigue on the psychophysiological responses, kinematic profiles, and technical performance in different small-sided soccer games. *Biol Sport*, 39 (4): 965–972. doi:[10.5114/biolSport.2022.110746](https://doi.org/10.5114/biolSport.2022.110746)

Staiano, W., Merlini, M., Romagnoli, M., Kirk, U., Ring, C., Marcora, S. (2022). Brain Endurance Training Improves Physical, Cognitive, and Multitasking Performance in Professional Football Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17 (3). doi:[10.1123/ijsp.2022-0144](https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0144)

Staiano, W., Salazar Bonet, L.R., Romagnoli, M., Ring, C. (2023). Mental fatigue impairs repeated sprint and jump performance in team sport athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*. doi:[10.1016/j.jsams.2023.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jsams.2023.10.016)

Sun H., Soh K., Mohammadi A., Wang X., Bin Z., Zhao Z. (2022). Effects of mental fatigue on technical performance in soccer players: A systematic review with a meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, 10, 922630. doi:[10.3389/fpubh.2022.922630](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.922630)

Sun H., Soh K., Roslan S., Wazir M., Soh K., Boullosa D. (2021). Does mental fatigue affect skilled performance in athletes? A systematic review. *Plos One*, 16(10), e0258307. doi:[10.1371/journal.pone.0258307](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258307)

Teixeira, J., Forte, P., Ferraz, R., Leal, M., Ribeiro, J., Silva, A., Barbosa, T., Monteiro, A. (2021). Monitoring Accumulated Training and Match Load in Football: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 3906. doi:[10.3390/ijerph18083906](https://doi.org/10.3390/ijerph18083906)

Thompson C., Noon M., Towlson C., Perry J., Coutts A., Harper L., Meyer T. (2020). Understanding the presence of mental fatigue in English academy soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 38(13), 1524–1530. doi:[10.1080/02640414.2020.1746597](https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1746597)

Thompson C., Smith A., Coutts A., Skorski S., Datson N., Smith M., Meyer T. (2021). Understanding the presence of mental fatigue in elite female football. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 93(3), 1–12. doi:[10.1080/02701367.2021.1873224](https://doi.org/10.1080/02701367.2021.1873224)

Trainer in der Kritik. „So darf es nie wieder werden“, sagt Kovac über seine Zeit beim FC Bayern (2024). Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://www.welt.de/sport/fussball/bundesliga/vfl-wolfsburg/article249877752/Trainer-in-der-Kritik-So-darf-es-nie-wieder-werden-sagt-Kovac-ueber-seine-Zeit-beim-FC-Bayern.html>

Tran, Y., Craig, A., Craig, R., Chai, R., Nguyen, H. (2020). The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses. *Psychophysiology* 57(5): 1-17. doi:[10.1111/psyp.13554](https://doi.org/10.1111/psyp.13554)

Trecroci, A., Boccolini, G., Duca, M., Formenti, D., Alberti, G. (2020). Mental fatigue impairs physical activity, technical and decision-making performance during small-sided games. *PLoS ONE*, 15(9). doi:[10.1371/journal.pone.0238461](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238461)

Vor Champions League. ManCity-Profi Rodri beklagt hohe Belastung – Streik eine Option (2024). Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://www.welt.de/sport/fussball/article253560908/Vor-Champions-League-ManCity-Profi-Rodri-beklagt-hohe-Belastung-Streik-eine-Option.html>

Wascher, E., Rasch, B., Sängers, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkenauer, G., Gutberlet, I., et al. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biological Psychology*, 96,57–65. doi:[10.1016/j.biopsycho.2013.11.010](https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010)

White, A. M., Gardner, W. P., Borsa, A. A., Argus, D. F., & Martens, H.R. (2022). A review of GNSS/GPS in hydrogeodesy: Hydrologic loading applications and their implications for water resource research. *Water Resources Research*, 58. doi:[10.1029/2022WR032078](https://doi.org/10.1029/2022WR032078)

Wikström L., Nilsson M., Broström A., Eriksson K. (2019). Patients' self-reported nausea: Validation of the Numerical Rating Scale and of a daily summary of repeated Numerical Rating Scale scores. *Journal of Clinical Nursing*, 28, 959–968. doi:[10.1111/jocn.14705](https://doi.org/10.1111/jocn.14705)

Wild, J.J., Bezodis, I.N., North, J. S., Bezodis, N.E. (2022). Characterising initial sprint acceleration strategies using a whole-body kinematics approach. *Journal of Sports Sciences*, 40:2, 203-214. doi:[10.1080/02640414.2021.1985759](https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1985759)

Windmann, A. (2018, März 9). Per Mertesacker von Arsenal London über die Härten des Fußballerlebens. Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://www.spiegel.de/sport/per-mertesacker-von-arsenal-london-ueber-die-haerten-des-fussballelebens-a-00000000-0002-0001-0000-000156211278>

Wolff, J. (2024, September 20). Zu viele Spiele, zu hohe Belastung? Auch Kompany bezieht Stellung. Zugriff am 08. Januar 2026 unter <https://www.welt.de/sport/article253606578/FC-Bayern-Vincent-Kompany-ueber-Werder-Bremen-und-die-vielen-Spiele-im-Profifussball.html>

Xu, R., Zhang, C., He, F., Zhao, X., Qi, H., Zhou, P., Zhang, L., Ming, D. (2018). How Physical Activities Affect Mental Fatigue Based on EEG Energy, Connectivity, and Complexity. Front. Neurol., 9:915. doi:[10.3389/fneur.2018.00915](https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00915)

9 Hilfsmittelverzeichnis

Für die Sichtung der Quellen, die Übersetzung selbiger, sowie erste Formulierungen ausgewählter Absätze, wurde KI-Tools herangezogen. Diese dienten lediglich als Hilfe und wurden nur unterstützend herangezogen.

KI-Tool	Funktion	Einsatzbereich	Anmerkung
ChatGBT 5.2	Entwicklung einer Struktur sowie sprachliche Überarbeitung	Gliederung, Formulierung	Die von der KI vorgeschlagene Gliederung wurden stark überarbeitet
NotebookLM	Übersetzung	Übersetzung der vorwiegend englischen Quellen	Die Übersetzungen wurden von mir nochmals kontrolliert

10 Abkürzungen

ME – mentale Ermüdung; EEG – Elektroenzephalografie; fNIRS – funktionelle Nahinfrarotspektroskopie; GNSS – Global Navigation Satellite System; GPS – Global Positioning System; HR – Herzfrequenz; HRV – Herzfrequenzvariabilität; LMM – lineares gemischtes Modell; LPS – Local Positioning System; NRS – Numerische Ratingskala; RIR – Repetitions in Reserve; RPE – Rating of Perceived Exertion; SSG – Small-Sided Game; TL – Trainingslast; VAS – Visuelle Analogskala; VRS – Verbale Ratingskala.

11 Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z. B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.

Wien am 09.01.2026