

Leistungsphysiologische Parameter einer U17 Fußballmannschaft im Saisonverlauf

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin (Dr. med.)

vorgelegt
der Medizinischen Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Jakob Josef Franziskus Glück

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank
apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig

Gutachter: Frau Prof. Dr. Maren Witt, Leipzig
Prof. Dr. Torsten Schubert, Halle

Datum der Verteidigung: 27.06.2023

Referat

Die Identifizierung objektiver, valider und zuverlässiger leistungsphysiologischer Parameter zur Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik im Fußball stellt eine große Herausforderung dar. Basierend auf dem grundlegenden Konzept „Belastung, Belastbarkeit und Beanspruchung“ ist das Erkennen und Quantifizieren der individuellen Beanspruchung eine entscheidende Maßnahme zur Prävention von Sportverletzungen. Darüber hinaus kann die Ermüdungsdiagnostik auch zur Trainingssteuerung genutzt werden.

Ziel dieser Studie war es, Belastung und Beanspruchung einer U17 Fußballmannschaft über eine Saison hinweg durch eine Kombination leistungsphysiologischer Parameter zu erfassen und neue Ansätze für die Ermüdungsdiagnostik zu schaffen.

Elf Spieler einer U17 Fußballmannschaft wurden an drei Messzeitpunkten (MZP) über eine Teilsaison (Juli bis November 2017) untersucht. Die Beanspruchung wurde durch die Laborparameter CK, CRP, LDH und IGF-1 quantifiziert. Zudem wurden *Drop Jumps* (DJ) und posturographische Messungen (*Interactive Balance System*; IBS) durchgeführt, welche als Produkt- und Prozessparameter die Schnittstelle zwischen Belastung und Beanspruchung abbildeten. Zur Darstellung der objektiv erfahrenen Belastung diente die Spieldauer zwischen zwei MZP (Intervallspielzeit) sowie innerhalb der letzten acht Tage vor einem MZP (8-Tage-Spielzeit). Es folgte eine Korrelationsanalyse zwischen den Spielzeiten und den Beanspruchungs- sowie Produktparametern, wobei die Beanspruchungs- und Produktparameter prozentual vom Ausgangsniveau (MZP 1; 09./10.07.2017) verwendet wurden. Überdies wurden die Laborwerte, Sprung- und IBS-Daten untereinander korreliert, um mögliche Zusammenhänge aufzudecken.

Bei den Laborparametern zeigten sich relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$) sowohl zwischen der Intervallspielzeit und CRP% ($r = 0,645$) sowie LDH% ($r = 0,589$), als auch zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% ($r = 0,783$) zum MZP 2 (28./29.08. 2017). Zum MZP 3 (07./08.11. 2017) sowie mit der CK und dem IGF-1 konnten dagegen keine relevanten Korrelationen festgestellt werden. Auch ergaben sich keine relevanten Korrelationen zwischen Spielzeit und posturaler Stabilität. Die DJ beidbeinig% ($r = 0,544$) und DJ links% ($r = 0,602$) korrelierten dagegen positiv mit der Intervallspielzeit zum MZP 3. Auch zwischen der 8-Tage-Spielzeit und den DJ beidbeinig% konnte zum MZP 3 eine positive Korrelation gefunden werden ($r = 0,706$). Beim Vergleich zwischen den einzelnen leistungsphysiologischen Parametern konnte zudem ein Zusammenhang zwischen Sprunghöhe und posturaler Instabilität zu allen drei MZP festgestellt werden ($0,411 \leq r \leq 0,744$).

Es konnten keine leistungsphysiologischen Parameter identifiziert werden, welche die zugrundeliegende Belastung zuverlässig widerspiegeln. Dennoch bestanden relevante Zusammenhänge zwischen der Spielzeit und CRP sowie LDH. Auch zeigten sich Veränderungen der Sprunghöhe mit steigender Spielbelastung. Die Validierung dieser Parameter sollte Gegenstand weiterer Forschungstätigkeit sein.

Glück, Jakob: Leistungsphysiologische Parameter einer U17 Fußballmannschaft im Saisonverlauf, Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss., 74 Seiten, 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Belastungen und Verletzungen im Fußball	1
1.2 Acute: Chronic Workload Ratio (ACWR).....	5
1.3 Belastung – Belastbarkeit – Beanspruchung	7
1.4 Ermüdung (<i>Fatigue</i>) und Erholtheit – Definition und Mechanismus.....	9
1.5 Leistungsphysiologische Parameter und Methoden.....	13
2 Zielstellung	18
3 Material und Methodik	20
3.1 Projektplanung und Studiendesign	20
3.2 Untersuchungsstichprobe	21
3.3 Messmethoden.....	22
3.3.1 Blutentnahme	22
3.3.2 Fragebögen und Trainingstagebücher	22
3.3.3 Posturographie (IBS)	23
3.3.4 Drop Jumps	26
3.4 Statistische Datenanalyse	27
4 Ergebnisse	29
4.1 Spielbelastung.....	30
4.2 Laborparameter.....	32
4.3 Posturographie (IBS).....	38
4.4 Drop Jumps	40
4.5 Korrelationen zwischen leistungsphysiologischen Parametern	45
5 Diskussion	47
5.1 Ergebnisdiskussion.....	48
5.2 Methodendiskussion (Limitationen)	59
6 Zusammenfassung	62
7 Literaturverzeichnis	63
8 Thesen	70
Anlagen	71

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ACWR	Acute: Chronic Workload Ratio
ADP	Adenosindiphosphat
AEB	Akutmaß Erholung und Beanspruchung
AST	Aspartat-Aminotransferase
ATP	Adenosintriphosphat
BMI	Body Mass Index
Bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CK	Kreatinkinase
CMJ	Counter Movement Jumps
CRP	C-reaktives Protein
DALDA	Daily Analyses of Life Demands for Athletes
d. h.	das heißt
DM	Deutsche Mark
DJ	Drop Jumps
DJ-RSI	Drop Jump Reactive Strength Index
DOMS	Delayed-Onset Muscle Soreness
EBF-Sport	Erholungs-Belastungs-Fragebogen für Sportler
EKG	Elektrokardiographie
EMG	Elektromyographie
et al.	et alii (Lateinisch: „und andere“)
etc.	et cetera (Lateinisch: „und übrige Dinge“)
F1	Frequenzbereich für das visuelle Subsystem
F2–4	Frequenzbereich für das peripher-vestibuläre Subsystem
F5–6	Frequenzbereich für das somatosensorische Subsystem
F7–8	Frequenzbereich für das zentrale, cerebelläre Subsystem
FC	Fußballclub
FFT	Fast Fourier Transformation
F-MARC	FIFA Medical Assessment and Research Centre
GH	growth hormone (Wachstumshormon)
GPS	global positioning system
HF	Herzfrequenz
HFV	Herzfrequenzvariabilität
HRV	Herzratenvariabilität
HWS	Halswirbelsäule
IBM	International Business Machines Corporation
IBS	Interactive Balance System
IGF	Insulin-like Growth Factor
IL	Interleukin
KEG	Kurzskala Erholung und Beanspruchung
kg	Kilogramm
L	Liter
LDH	Laktatdehydrogenase
min	Minute
ml	Milliliter
mg	Milligramm
MUAPs	motor unit action potentials
MZP	Messzeitpunkt
ng	Nanogramm
OR	odds ratio
PC	(with) Pads, Closed eyes

POMS	Profile of Mood States
ROS	reactive oxygen species
RPE	rating of perceived exertion
ST	Stabilitätsindikator
Std.	Stunde
Tab.	Tabelle
TQR	total quality recovery scale
TMA	time-motion analysis
U	Units
ÜTS	Übertrainingssyndrom
vgl.	vergleiche
Vit.	Vitamin
VO _{2max}	maximales Sauerstoffvolumen (maximale Sauerstoffaufnahmekapazität)
WDI	weight distribution index
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

1 Einleitung

Die optimale Balance zwischen physischer Belastung und Regeneration stellt im Leistungssport eine große Herausforderung dar und ist für jeden Athleten individuell zu ermitteln. Fehlerhaftes Management kann zum Auftreten von chronischer Überbeanspruchung und Fehlanpassung (Maladaptation) führen und ist ein Hauptrisikofaktor für Sportverletzungen (Drew und Finch, 2016).

Aus diesem Grund ist es von Bedeutung, körperliche Belastung und Beanspruchung durch relevante Indikatoren zu identifizieren und zu analysieren, sodass Belastungs- und Erholungsphasen besser aufeinander abgestimmt werden können. Des Weiteren bietet ein gutes Monitoring von Belastungsparametern ein besseres Verständnis von Trainingseffekten und Spielleistung, was wiederum zur Trainingsoptimierung genutzt werden kann (Halson, 2014).

Besonders im Fußball besteht aufgrund der hohen Trainings- und Spieldichte eine hohe Belastung und Beanspruchung der Spieler und das Verletzungsrisiko ist ausgesprochen hoch (Stubbe et al., 2015). Somit kann die Überwachung von Belastungsparametern, ebenso wie die Erhöhung der Belastbarkeit, erheblich zur Risikoreduktion von Verletzungen beitragen (Gabbett, 2016).

1.1 Belastungen und Verletzungen im Fußball

Fußball ist nicht nur die am häufigsten ausgeübte Sportart weltweit mit schätzungsweise 270 Millionen aktiven Spielern (FIFA, 2007), sondern auch die Sportart mit der höchsten Verletzungsinzidenz in Deutschland (Henke et al., 2014). Im Jahr 2003 registrierte die Schweizer Unfallversicherung über 42.000 Verletzungen durch Fußball, welche Kosten in Höhe von 145 Millionen Schweizer Franken (ca. 130 Millionen Euro) verursachten (Junge et al., 2011). Eliakim et al. (2020) schätzen die verletzungsbedingten Kosten einer englischen *Premiere League* Mannschaft auf durchschnittlich 45 Millionen Britische Pfund (ca. 52 Millionen Euro) pro Saison. In Deutschland werden jährlich ca. 2 Millionen Sportverletzungen registriert, von denen Fußball mit Abstand (47%) die häufigste Ursache darstellt (Henke et al., 2014). In einer Studie aus dem Jahr 2000 wurden die jährlichen Gesamtkosten in Deutschland, die durch Sportverletzungen entstehen, auf ca. acht Milliarden DM (ca. 4,1 Milliarden Euro) geschätzt, wovon ca. 2,6 Milliarden DM (ca. 1,3 Milliarden Euro) auf das Gesundheitswesen fallen (Henke et al., 2000). Eine Minimierung der Verletzungsinzidenz sollte also auch im gesamtgesellschaftlichen Interesse liegen.

Eine Verletzung im Fußball wird nach F-MARC (*Fifa Medical and Research Centre*) als „jede physische Beschwerde, die durch Fußball verursacht wurde“ definiert und kann in

Kontakt- und Nicht-Kontaktverletzung unterteilt werden. Der Schweregrad reicht von „milder Verletzung“ (ein bis sieben Tage Ausfallzeit – ca. 50% aller Verletzungen) über „mittelschwere Verletzung“ (acht bis maximal 28 Tage Ausfallzeit – ca. 30% aller Verletzungen) bis hin zu „schwerer Verletzung“ (mehr als 28 Tage Ausfallzeit – zehn bis 16% aller Verletzungen). Als *time-loss injury* wird dabei eine Verletzung bezeichnet, die einen Trainings- und/ oder Spielausfall zur Folge hat (F-MARC, 2015).

In einer Studie mit niederländischen Profifußballspielern aus dem Jahr 2015 (Stubbe et al., 2015) konnte gezeigt werden, dass 63% der Sportler (n = 136) innerhalb einer Saison von einer Verletzung mit Trainingsausfall (*time-loss injury*) betroffen waren, welche zum Großteil (83%) im Bereich der unteren Extremitäten lagen. Besonders häufig waren Verletzungen des Oberschenkels (23%) und Knies (21%) zu beobachten (Tab. 1). Meistens waren die Verletzungen akut (69%) und traten während eines Spiels auf (59%). Am häufigsten stand das Verletzungsgeschehen in Verbindung mit Gegnerkontakt (33%), Sprüngen (12%) und körperlicher Ermüdung (11%). Im Median fielen die Spieler acht Tage (Range: 1–752 Tage) aus, wobei Knieverletzungen mit 45 Tagen Trainingsausfall durchschnittlich am längsten dauerten.

Tab. 1: Übersicht aller Verletzungen der niederländischen Profifußballer im Jahr 2015 (modifiziert nach Stubbe et al., 2015, S. 213)

Verletzte Körperregion	Spiel (n = 170)	Training (n = 114)	Total (n = 286)
	n (%)	n (%)	n (%)
Kopf/ Nacken	6 (4)	5 (4)	11 (4)
Kopf/ Gesicht	6 (4)	4 (4)	10 (4)
Genick/ HWS	0	1 (1)	1 (0)
Obere Extremitäten	3 (2)	4 (4)	7 (2)
Schulter/ Schlüsselbein	2 (1)	2 (2)	4 (1)
Ellenbogen	1 (1)	0	1 (0)
Hand/ Finger	0	2 (2)	2 (1)
Rumpf	18 (11)	12 (11)	30 (10)
Brustbein/ Rippen/ oberere Rücken	4 (2)	3 (3)	7 (2)
Unterer Rücken	7 (4)	7 (6)	14 (5)
Becken/ Hüfte	7 (4)	2 (2)	9 (3)
Untere Extremitäten	143 (84)	92 (81)	237 (83)
Leiste	15 (9)	15 (13)	30 (11)
Hinterer Oberschenkel	29 (17)	15 (13)	44 (15)
Vorderer Oberschenkel	11 (7)	10 (9)	22 (8)
Knie	38 (22)	23 (20)	61 (21)
Unterschenkel/ Achillessehne	19 (11)	15 (13)	34 (12)
Knöchel	20 (12)	10 (9)	30 (11)
Fuß/Zehen	11 (7)	4 (4)	16 (6)
Unbekannt	0	1 (1)	1 (0)

Basierend auf einer weiteren Studie zu Verletzungen im Fußball in verschiedenen Alters- und Leistungsgruppen wurde eine durchschnittliche Inzidenz von 2,1 Verletzungen pro Spieler innerhalb eines Jahres festgestellt (F-MARC, 2015). 82% erlitten mindestens

eine Verletzung, von denen jedoch 85% als mild oder mittelschwer eingestuft wurden. Knapp die Hälfte waren Kontaktverletzungen und wurden vor allem durch *Fouls* verursacht. Für alle Altersgruppen galt, dass Spieler auf einem hohen Leistungsniveau seltener Verletzungen erlitten als Spieler auf einem niedrigeren Niveau.

Bowen et al. (2020) fanden heraus, dass vor allem Belastungsspitzen mit einem erhöhten Verletzungsrisiko im Fußball assoziiert sind, wobei eine hohe chronische Belastung die Inzidenz verringerte. Zudem zeigte sich ein fünffach erhöhtes Verletzungsrisiko während eines Fußballspiels bei englischen *Premiere League*-Spielern, wobei vor allem Kontaktverletzungen während eines Spiels häufiger auftraten. Auch die Spielerfahrung scheint einen Einfluss auf die Verletzungsinzidenz zu haben. Besonders Anfänger, aber auch Spieler mit mehr als sechs Jahren Spielerfahrung zeigten einer Studie zufolge eine erhöhte Verletzungsgefahr (Abb. 1a; Malone et al., 2017a). Dagegen sank das Verletzungsrisiko bei einer guten Grundlagenausdauer (Abb. 1b) sowie einer hohen Relativkraft der unteren Extremitäten (Abb. 1c).

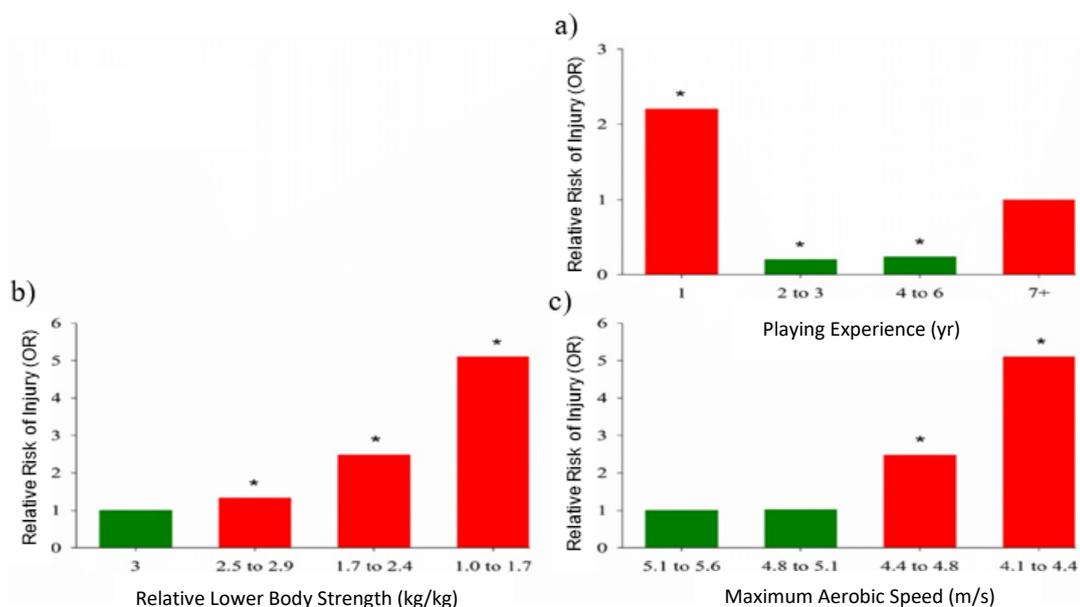


Abb. 1a-c: Relatives Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von Spielerfahrung (a), Grundlagenausdauer (b) und Relativkraft der unteren Extremitäten (c). Spieler mit einer Spielerfahrung (*Playing Experience*) von bis zu einem Jahr und mehr als sieben Jahren zeigten ein weit höheres Verletzungsrisiko als Spieler mit zwei bis sechs Jahren Spielerfahrung (a). Spieler mit maximal aerober Laufgeschwindigkeit (*Maximum Aerobic Speed*) von über 4,8 m/s (ca. 17 km/h) hatten ein niedrigeres Verletzungsrisiko als Spieler mit niedrigerer Laufgeschwindigkeit (b). Mit steigender Relativkraft der unteren Extremitäten zeigte sich eine Abnahme des Verletzungsrisikos (c) (Gabbett, 2020, S. 62).

Der F-MARC zufolge waren in einer Studie mit 398 männlichen Fußballspielern die meisten schweren Verletzungen traumatologischen Ursprungs (ca. 82%) und nur ca. 18% aufgrund von Überbeanspruchung. Während jugendliche Spieler (14–18 Jahre) vor allem Gelenksverstauchungen, Frakturen, Prellungen und Wirbelsäulenverletzungen zu verzeichnen hatten, zeigten sich bei Spielern über 18 Jahren vermehrt Muskelzerrungen,

Bandrupturen und Meniskusverletzungen. Die Häufigkeitsverteilung der schweren Verletzungen in den verschiedenen Altersgruppen ist in Abb. 2 dargestellt (F-MARC, 2015).

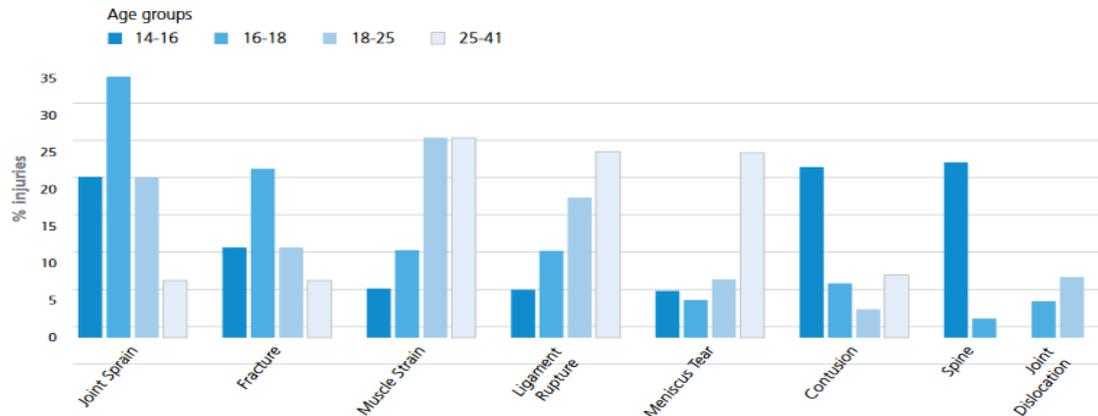


Abb. 2: Relative Verletzungsinzidenz von schweren Verletzungen bei männlichen Fußballspielern unterschiedlicher Altersgruppen. Während bei den 14–16-Jährigen Prellungen (*Contusion*), Wirbelsäulenverletzungen (*Spine*) und Gelenksverstauchungen (*Joint Sprain*) dominierten, waren es bei den 16–18-Jährigen vor allem Gelenksverstauchungen und Frakturen (*Fractures*), bei den 18–25-Jährigen Gelenksverstauchungen, Muskelzerrungen (*Muscle Strain*) und Bandrupturen (*Ligament Rupture*) und bei den 25–41-Jährigen hauptsächlich Muskelzerrungen, Bandrupturen und Meniskusrisse (*Meniscus Tear*) (F-MARC, 2015, S. 17).

In einer Studie Verletzungen im Frauenfußball betreffend konnte gezeigt werden, dass *Tackle* und *Foulspiel* die häufigsten Ursachen der Kontaktverletzungen waren, während Nicht-Kontaktverletzungen besonders beim Laufen, Richtungswechsel und Schießen entstanden (Abb. 3) (F-MARC, 2015).

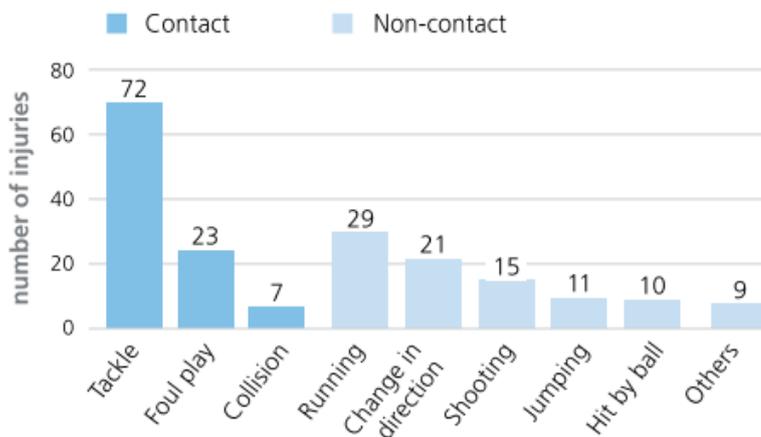


Abb. 3: Ursachen von Kontakt- und Nicht-Kontaktverletzungen und deren Häufigkeiten bei Fußballspielerinnen. Bei den Kontaktverletzungen dominierten Tackle, gefolgt von Foulspiel (*Foul play*) und Zusammenstoß (*Collision*). Nicht-Kontaktverletzungen entstanden vor allem beim Rennen (*Running*), Richtungswechsel (*Change in direction*), Schießen (*Shooting*), Springen (*Jumping*) und beim getroffen werden mit dem Ball (*Hit by ball*) (F-MARC, 2015, S. 19).

1.2 Acute: Chronic Workload Ratio (ACWR)

Die Beziehung zwischen Belastung und Verletzungsrisiko wird häufig durch das *Acute: Chronic Workload Ratio (ACWR)* beschrieben. Das ACWR ist ein Modellierungsansatz, mit dem relative Änderungen in der Belastung des Athleten überwacht und untersucht werden, welche auf ein erhöhtes Verletzungsrisiko hinweisen können (Andrade et al., 2020). Mit Hilfe dieses Modells soll das Verletzungsrisiko minimiert werden, indem sich der Athlet nur im „sicheren“ Belastungsniveau bewegt (Abb. 4). Die akute Belastung (*acute workload*) stellt dabei die Belastung in den letzten sieben Tagen dar und steht in enger Verbindung mit der Ermüdung des Athleten. Die chronische Belastung (*chronic workload*) bezeichnet die durchschnittliche wöchentliche Belastung in den letzten vier Wochen und spiegelt somit die Belastbarkeit des Athleten wider. Der *sweet spot* zeigt den Bereich des niedrigsten Verletzungsrisikos und wird in der Literatur als ein ACWR von 0,8 bis 1,3 angegeben. Ab einem ACWR von 1,5 befindet sich der Athlet in der *danger zone* und hat somit ein erhöhtes Risiko, sich in den darauffolgenden Tagen zu verletzen (Gabbett, 2016).

Demnach wäre eine Belastungssteigerung von über 50% relativ zur chronischen Belastung ein Risikofaktor für Sportverletzungen und sollte vermieden werden. Dies gestaltet sich jedoch gerade im hochklassigen Fußball schwierig, denn die hohe Spieldichte führt zu häufigen und starken Belastungssteigerungen (*spikes*) mit nur kurzen Regenerationsphasen dazwischen (Bowen et al., 2020).



Abb. 4: Verletzungsrisiko in Abhängigkeit vom *Acute: Chronic Workload Ratio*. Der *sweet spot* (grüne Fläche) stellt den Bereich des niedrigsten, die *danger zone* (rote Fläche) den Bereich des höchsten Verletzungsrisikos in Abhängigkeit vom ACWR dar (Gabbett, 2016, S. 6).

Gemäß diesem Modell kann außerdem geschlussfolgert werden, dass eine hohe chronische Belastung protektiv wirkt und eine niedrige chronische Belastung das Verletzungsrisiko erhöht. Dies konnte in Studien bestätigt werden (Gabbett, 2016; Bowen et al., 2020; Gabbett, 2020; Andrade et al., 2020) und ist am Beispiel von Cricket-Werfern (*cricket fast bowlers*) veranschaulicht (Hulin et al., 2014; Abb. 5).

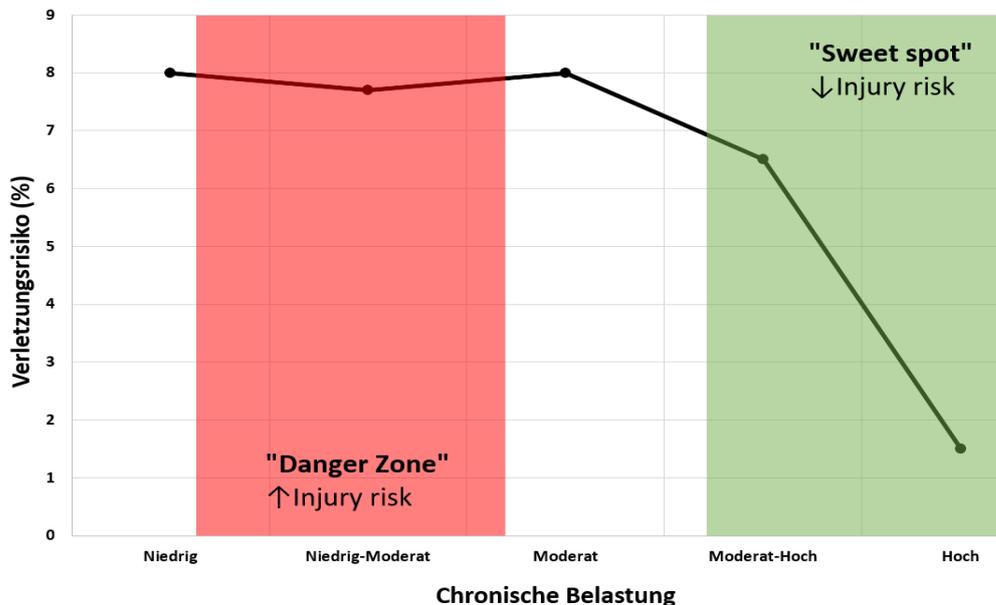


Abb. 5: Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von chronischer Belastung bei Cricket-Werfern. Analog zu Abb. 4 zeigt die *danger zone* den Bereich mit dem höchsten, der *sweet spot* den Bereich mit dem niedrigsten Verletzungsrisiko (modifiziert nach Gabbett, 2020, S. 61)

Bowen et al. (2020) kamen in einer Studie mit 33 Profifußballspielern der englischen *Premiere League* zu dem Ergebnis, dass vor allem ein ACWR von > 2 zusammen mit einer niedrigen chronischen Belastung ein fünf- bis siebenfach erhöhtes Verletzungsrisiko zur Folge hatte. Am häufigsten betroffen war dabei das Kniegelenk, wobei hier Nicht-Kontaktverletzungen dominierten (69%). Doch auch ein sehr niedriges ACWR scheint sich negativ auf die Verletzungsinzidenz auszuwirken. In einer Studie mit 48 professionellen Fußballspielern führte ein ACWR von 1 bis 1,25 sowie eine gute Grundlagenausdauer zu einer niedrigeren Verletzungsinzidenz verglichen mit einem ACWR von $\leq 0,85$ (Malone et al., 2017b). Das ACWR-Modell ist also eine Art Richtlinie, die zur Reduktion des Verletzungsrisikos beitragen kann. Da Verletzungen im Sport jedoch multifaktoriellen Ursprungs sind (Bittencourt et al., 2016), kann dieses Konzept sicherlich nur in begrenztem Maße zur Risikoreduktion beitragen.

1.3 Belastung – Belastbarkeit – Beanspruchung

Körperliche Belastung, die individuelle Belastbarkeit des Athleten und die resultierende Beanspruchung des Organismus stehen in einem engen Zusammenhang miteinander. Wirken Belastungsreize auf den Körper, müssen diese zunächst vom Organismus verarbeitet werden, was schließlich in einer biologischen Antwort des Körpers auf den physischen Reiz resultiert. Bei sehr hoher Belastung und/ oder sehr niedriger Belastbarkeit besteht ein Ungleichgewicht, welches unter anderem zu einem erhöhten Verletzungsrisiko führen kann (Abb. 6). Analog zum Modell des ACWR (Kapitel 1.2) erhöht eine hohe akute Belastung (*workload spike*) bei gleichzeitig niedriger Belastbarkeit (*aerobic fitness*) das Verletzungsrisiko (*injury* = Beanspruchung). Andersherum senkt eine hohe Belastbarkeit das Verletzungsrisiko (Windt et al., 2017).

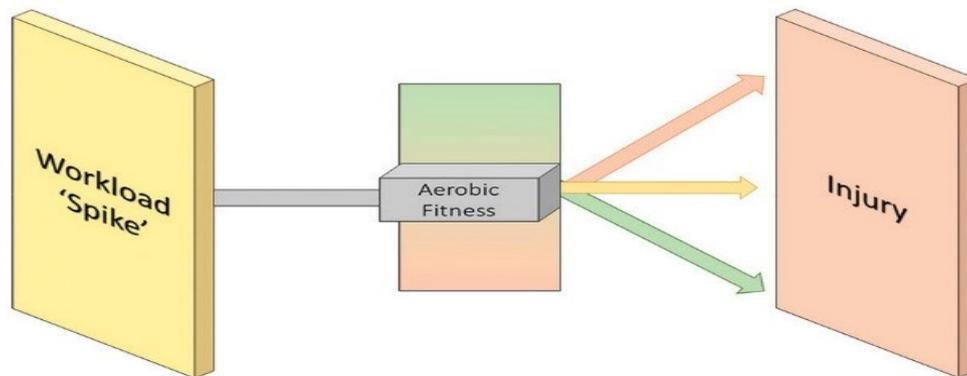


Abb. 6: Zusammenhang zwischen akuter Belastung (*Workload Spike*), Belastbarkeit (*Aerobic Fitness*) und Beanspruchung (*Injury*). Belastungsspitzen können je nach Belastbarkeit des Sportlers zu einem erhöhten Verletzungsrisiko führen. Eine niedrige Belastbarkeit (roter Bereich) erhöht demnach das Verletzungsrisiko, während eine hohe Belastbarkeit (grüner Bereich) vor Verletzungen schützt (Windt et al., 2017, S. 1).

Unter dem Begriff Belastung (*load*) versteht man in der Sportwissenschaft und Sportmedizin generell physiologische, psychologische und mechanische Stressfaktoren, die als Stimuli auf ein menschliches biologisches System wirken (Soligard et al., 2016). In der englischen Literatur wird physische Belastung in „innere Belastung“ (*internal load* = Beanspruchung) und äußere Belastung (*external load* = Belastung) unterschieden. Die (äußere) Belastung (*external load*) beinhaltet alle externen Stimuli, die auf den Athleten einwirken und können zur Messung der insgesamt verrichteten Arbeit herangezogen werden (Halson, 2014). Die (innere) Beanspruchung (*internal load*) stellt hingegen die individuelle, biologische Reaktion des Organismus auf die äußere, mechanische Belastung dar und ist ebenfalls zur Überwachung der Gesamtbelastung von großer Wichtigkeit (Soligard et al., 2016).

Die Belastbarkeit hingegen ist das individuelle Maß für das Verarbeiten einer äußeren Belastung ohne gesundheitliche Schädigung (Edelmann, 2008). Ein wesentlicher Aspekt

einer hohen Belastbarkeit ist das Vorhandensein einer guten Grundlagenausdauer (*aerobic fitness*; Abb. 6). Liegt ein Missverhältnis zwischen Beanspruchung und Belastbarkeit vor, kann dies über längere Zeit zu einem Übertrainingssyndrom (ÜTS) führen. Besonders wenn die Belastbarkeit z. B. aufgrund von körperlicher Ermüdung, Erkrankung oder psychischem Stress verringert ist, besteht die Gefahr eines ÜTS (Raschka und Nitsche, 2016).

Während in Individualsportarten wie Schwimmen, Radfahren oder Triathlon die Belastung relativ einfach anhand von Trainingsvolumen, -dauer und -intensität gemessen werden kann, gestaltet sich dies in Team sportarten wie Fußball schwieriger, da hier eine größere Variation an Trainingsaktivitäten stattfindet. Häufig verwendete Belastungsparameter bei Team sportarten sind deshalb z. B. Bewegungsanalysen, physiologische Veränderungen, *time-motion analysis* (TMA) (meist durch *GPS-tracking*) und möglichst wettkampfnaher Fertigkeitstests (Halson, 2014).

Im Fußball ist ein gut messbarer Belastungsparameter beispielsweise die gelaufene Gesamtstrecke, welche wiederum nach der Laufgeschwindigkeit in unterschiedliche Belastungsstufen unterteilt werden kann. So haben Clemente et al. (2019) die Gesamtlaufstrecke in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit (*running distance*, 14–19,9 km/h, *high-speed running*, 20–25 km/h, *sprinting distance*, > 25 km/h) unterteilt. Geschwindigkeiten unter 14 km/h wurden aufgrund der niedrigen Belastung nicht beachtet. Die Bewegungen der Spieler wurden mittels GPS (*global positioning system*) erfasst und die wöchentliche Gesamtlaufstrecke errechnet. Nachteil an dieser Methode ist jedoch das fehlende Monitoring von Sprüngen, Schüssen, Pässen und Zweikämpfen. Zudem ist die Reliabilität des *GPS-Tracking* bei hohen Laufgeschwindigkeiten sowie schnellen Richtungswechseln reduziert (Aughey, 2011).

Ebenfalls weit verbreitet in Team sportarten sind neuromuskuläre Funktionstests, da sie relativ einfach durchführbar und wenig belastend für die Spieler sind (Twist und Highton, 2012). Dazu zählen z. B. Sprinttests und *Squat Jumps*, welche zur Erhebung von Parametern wie Bodenkontaktzeit, Sprunghöhe, Geschwindigkeit, Kraftentwicklung etc. genutzt werden können.

Da in jeder Sportart unterschiedliche Bewegungsabläufe und Belastungsreize vorkommen, sollte die Auswahl an Parametern zum *load*-Monitoring individuell gewählt werden. Meist wird dabei eine Kombination verschiedener Methoden gewählt, da bisher kein einzelner Parameter identifiziert werden konnte, der präzise und zuverlässig ist (Halson, 2014). Tabelle 2 enthält wesentliche Belastungs- und Beanspruchungsparameter.

Tab. 2: Beispiele für etablierte Belastungs- und Beanspruchungsparameter (modifiziert nach Soligard et al., 2016, S. 1032).

Belastungsparameter	Beanspruchungsparameter
<ul style="list-style-type: none"> • Belastungsdauer • Trainings- oder Wettkampffrequenz • Art des Trainings oder Wettkampfs • Gelaufene Strecke • Geschwindigkeit • Anzahl der Wiederholungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Herzfrequenz • Wahrnehmung der Anstrengung • Serum-Laktat-Konzentration • Schlafqualität und -dauer • Psychologische Fragebögen und Trainingstagebücher • Psychomotorische Geschwindigkeit • Biochemische, hormonelle und immunologische Parameter (CK, Cortisol, IgA etc.)

1.4 Ermüdung (*Fatigue*) und Erholtheit – Definition und Mechanismus

Zu dem Begriff Ermüdung (*Fatigue*) gibt es aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsweise in verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten bisher keine allgemein gültige Definition (Tiesinga et al., 1996). Aaronson et al. (1999) definieren Ermüdung als die Wahrnehmung einer verringerten physischen und/ oder psychischen Leistungsfähigkeit aufgrund eines Ungleichgewichts in der Verfügbarkeit, Nutzbarmachung und/ oder Wiederherstellung von Reserven, die zur Ausübung von Aktivitäten benötigt werden. Enoka und Duchateau (2016) definieren Ermüdung als ein Symptom, bei dem physische und kognitive Funktionen durch Interaktionen zwischen physischer und empfundener Ermüdbarkeit limitiert sind. Diesen beiden Definitionen zufolge könnte Ermüdung jedoch nur durch Selbsteinschätzung des Athleten quantifiziert werden, da sie rein subjektiv ist. Einen anderen Ansatz bietet Halson (2014), welcher Ermüdung als Unfähigkeit eine Aufgabe zu vollenden, die noch vor Kurzem möglich war, definiert. Diese Definition beschreibt Ermüdung also weniger subjektiv, sondern lässt stattdessen eine Messung durch objektive Parameter zu. Da Ermüdung jedoch aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden kann, ist eine allgemein gültige Definition in der Sportmedizin und Sportwissenschaft problematisch. Ermüdung kann unter anderem in physische und mentale Ermüdung unterteilt werden (Wan et al., 2017). Auch unterscheidet man akute (< 1 Monat), prolongierte (1–6 Monate) und chronische Ermüdung (> 6 Monate) (Son, 2019).

Im Zusammenhang mit fußballspezifischer Belastung ist vor allem die physische bzw. Muskelermüdung von Bedeutung, welche als „reversible Verringerung der Fähigkeit eines Muskels zur Krafterzeugung“ (Luttmann und Jäger, 2013) definiert werden kann. Wichtig dabei ist, dass diese Leistungsminderung nicht zum Abbruch der Tätigkeit führt

oder eine völlige Erschöpfung des Muskels bedeutet. Lediglich die maximale Kraft, die durch den Muskel ausgeübt werden kann, ist reduziert (Enoka und Duchateau, 2008). Bei muskulärer Ermüdung wird zudem zwischen zentraler und peripherer Komponente unterschieden. Während die zentrale muskuläre Ermüdung ihren Ursprung im zentralen Nervensystem im Sinne einer verringerten neuralen Feuerrate hat, liegt die Ursache der peripheren Ermüdung an der motorischen Endplatte bzw. distal davon (Wan et al., 2017). Die Mechanismen hinter muskulärer Ermüdung sind vielfältig und komplex, was eine Messung sehr schwierig macht. Unter anderem konnten metabolische Veränderungen im Muskel (Anreicherung von Laktat und ADP, Verbrauch von Kreatinphosphat und Glykogen) als mögliche Auslöser von Muskelermüdung ausfindig gemacht werden (Sahlin, 1992). Auch eine verringerte Feuerrate von Motoneuronen, ein Verbrauch von Kalziumionen, ein verringerter Sauerstofftransport, die Anreicherung von Protonen, Phosphat und ROS (reaktive Sauerstoffspezies) sowie einige Hormone und Proteine (Cortisol, Katecholamine, hitzestabile Proteine, IL-6, Orosomucoid etc.) spielen möglicherweise ebenfalls eine entscheidende Rolle (Wan et al., 2017). Der Einfluss bestimmter Metaboliten ist jedoch bisher noch nicht eindeutig geklärt. Beispielsweise fanden Overgaard und Højfeldt (2010) heraus, dass Laktat sogar die Muskelermüdung verhindern kann, indem es die depolarisierenden Effekte von Kaliumionen auf zellulärer Ebene neutralisiert.

Die muskuläre Ermüdung ist das Resultat aus vorangegangenen Trainingsreizen und bildet die Grundlage für eine adaptive Leistungssteigerung (Pyne und Martin, 2011). Voraussetzung dafür sind ausreichende Erholungsphasen, in denen der Körper leistungsverbessernde Anpassungen auf molekularer und struktureller Ebene vornehmen kann (Hottenrott und Neumann, 2010). Traditionell hat sich als einfaches Reiz-Reaktions-Schema das Superkompensationsmodell von Jakowlew (1976) bewährt (Abb. 7). Demnach führt ein Trainingsreiz zu einer transienten Leistungsminderung (Ermüdung), gefolgt von einer über das Ausgangsniveau hinausgehenden Leistungssteigerung bei ausreichender Erholung. Die Superkompensationshypothese besagt, dass aufgrund der belastungsbedingten Abnahme des Muskel- und Leberglykogens eine erhöhte Glykolyse und/ oder oxidative Phosphorylierung stattfindet. In der Erholungsphase kommt es durch zusätzliche Glukoseaufnahme durch die Nahrung zu einer erhöhten Insulinausschüttung und Glykogensynthese. Die Folge ist, dass die Glykogenspeicher in der beanspruchten Muskulatur vergrößert werden. Allerdings gibt es keine zuverlässigen Belege für dieses Modell, weshalb es bereits mehrfach in die Kritik geraten ist. Dennoch wird es weiterhin in der Sportwissenschaft und Sportmedizin von der Mehrheit anerkannt (Hottenrott und Neumann, 2010).

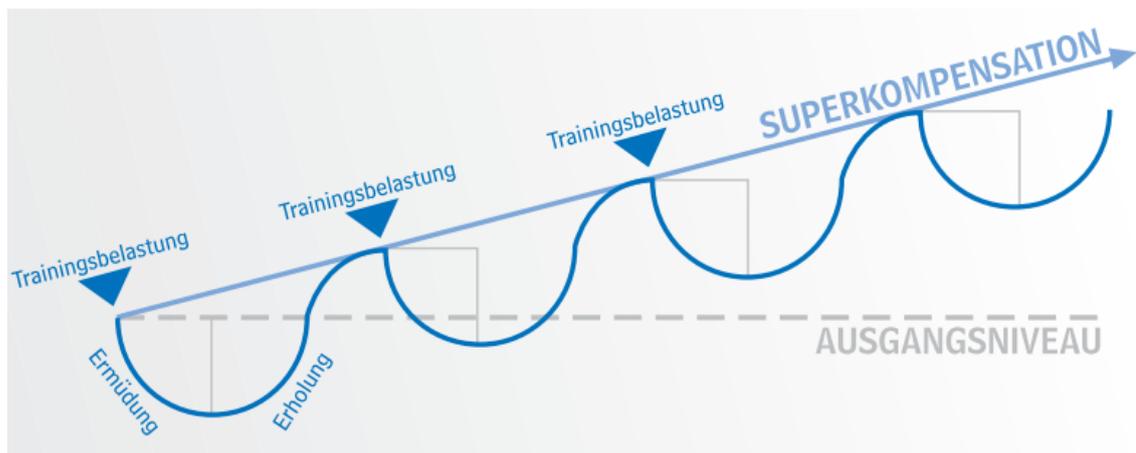


Abb. 7: Superkompensationsmodell nach Jakowlew (1976). Demnach führt ein Trainingsreiz zu einer transienten Leistungsminderung (Ermüdung), welche nach ausreichender Erholung in eine Leistungssteigerung mündet (= Superkompensation). Bei wiederholtem Trainingsreiz, ausgehend von dem erhöhten Ausgangsniveau, kann eine weitere Leistungssteigerung erreicht werden (Hottenrott und Neumann, 2010, S. 15).

Ein realitätsnäheres Modell zur Beschreibung trainingsabhängiger Anpassungsvorgänge bietet das Vierstufenmodell von Neumann und Berbalk (1991). Dabei wird die Adaptation auf Trainingsreize in vier Stufen unterteilt (Tab. 3). Diese können sich zeitlich überlagern und sind nach frühestens vier bis sechs Wochen abgeschlossen. Vermutlich ist dieses Modell jedoch nur für ein ausdauerorientiertes Training zutreffend, ebenso wie das Superkompensationsmodell im Ursprung (lediglich) den Kohlenhydratstoffwechsel (überschießende Auffüllung der Glykogenspeicher) adressierte. Generell ist die Leistungssteigerung immer vom Grundniveau des Sportlers abhängig. Untrainierte können ihre Leistung schneller steigern als Athleten, die bereits ein hohes Leistungsniveau besitzen (Hottenrott und Neumann, 2010).

Tab. 3: Vierstufenmodell nach Neumann und Berbalk (1991) (modifiziert nach Hottenrott und Neumann, 2010, S. 17).

Stufenbeschreibung	Vorrangige Anpassungsvorgänge
1: Veränderung im Bewegungsprogramm	↑ Feuerrate der Motoneuronen, ↑ inter- und intramuskuläre Koordination, ↓ Herzfrequenz
2: Vergrößerung der Energiespeicher	↑ Kreatinphosphat- und Glykogenspeicher durch Expression metaboler Gene
3: Optimierung geregelter Systeme und Strukturen	↑ Anzahl an Mitochondrien (Ausdauertraining), Muskelhypertrophie (widerstandsorientiertes Training)
4: Koordinierung leistungsbeeinflussender Systeme	Anpassung von zentralem und vegetativem Nervensystem, kardiopulmonalem System, Elektrolythaushalt, Energiestoffwechsel, Hormonsystem, Immunsystem

Der Begriff Erholung kann als „aktiver und zielgerichteter Prozess, um Beanspruchung und deren Folgen auszugleichen“ (Kellmann, 2018) definiert werden. Dabei steht neben der physischen auch die metabolische und mentale Regeneration im Vordergrund (Meyer et al., 2013). Studien zufolge benötigen Profifußballer nach einem Spiel 72 Stunden und länger, bis physische und metabolische Parameter wieder auf Ausgangsniveau sind (Andersson et al., 2008; Ispirlidis et al., 2008; Magalhães et al., 2010). Demnach ist es nicht verwunderlich, dass bei einer hohen Spieldichte von zwei Spielen pro Woche keine ausreichenden Erholungsphasen gegeben sind.

Die meisten wissenschaftlichen Studien untersuchen zudem nur die akute Ermüdung und Erholung innerhalb der ersten 24 Stunden nach einem Spiel, nicht jedoch über mehrere Tage und Wochen hinweg (Meyer et al., 2013). Gerade die kumulative Ermüdung ist jedoch ein wichtiger Risikofaktor von Verletzungen und Krankheiten, weshalb ein Ermüdungs- und Erholungsmonitoring von Fußballspielern empfohlen wird (Brink et al., 2010). Leider konnte im Fußball bisher kein Erholtheitsparameter ermittelt werden, der objektiv, zuverlässig und valide ist und ohne größeren Aufwand und Zusatzbelastung erhoben werden kann (Meyer et al., 2013). Um den Regenerationsbedarf von Athleten evaluieren zu können, ist eine Messung der Ermüdung, bzw. Erholtheit jedoch erforderlich. Es steht eine Vielzahl an Parametern zur Verfügung, jedoch ist eine Beurteilung des Ermüdungszustands meist sehr aufwändig und benötigt eine Kombination verschiedener Parameter. Ein weiteres Problem ist, dass die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen von Ermüdungsindikatoren an unterklassigen Fußballspielern durchgeführt wurden, während im Profibereich nur wenige Studien vorhanden sind. Es besteht also ein großes Forschungsdefizit im Profifußball, welches es möglichst aufzuarbeiten gilt (Meyer et al., 2013).

1.5 Leistungsphysiologische Parameter und Methoden

Die Leistungsphysiologie beschäftigt sich mit den metabolischen, physiologischen und strukturellen Anpassungen des Körpers auf körperliche Aktivität (The American Heritage® Medical Dictionary, 2007). In der Sportmedizin kommen hier vor allem kardiopulmonale und konditionelle Untersuchungsmethoden sowie spezielle Leistungsdiagnostika des Bewegungsapparates (z. B. Beweglichkeits- und Kraftmessung, EMG etc.) zum Einsatz (Tab. 4; Maier et al., 2015; Raschka und Nitsche, 2016).

Tab. 4: Übersicht häufig verwendeter leistungsdiagnostischer Methoden in der Sportmedizin (zusammengefasst aus Maier et al., 2015, S. 20–37; Raschka und Nitsche, 2016, S. 45–97)

Anthropometrie	Ruhemessung	Ausdauer-Belastungsmessung	Sensomotorik – Kraft und Beweglichkeit
Körpergröße	Ruhepuls	Laktatkonzentration	Beweglichkeitsmessung
Körpergewicht	Ruhe- und Belastungsblutdruck	Spiroergometrie	Kraftmessung
Körperzusammensetzung	Ruhe- und Belastungs-EKG	Herzfrequenzvariabilität	Bewegungsanalyse
	Echokardiographie	Maximale Sauerstoffaufnahme ($V_{O_{2max}}$ -Test)	Druckverteilungsmessung
	Spirometrie		EMG
			Messung der Sensomotorik (Einbeinstand, Tandemstand)

Die Wahl der Parameter erfolgt sportartspezifisch und ist abhängig von der zu untersuchenden Leistungsfähigkeit. Beispielsweise werden zur Messung der Ausdauerleistung häufig der Laktatstufentest, der VO_{2max} -Test und/ oder Kapazitätstests verwendet (Maier et al., 2015). Die Messung von Muskelkraft unterscheidet man physikalisch gesehen in isoinertiale, isometrische und isokinetische Messmethoden (Maier et al., 2015). Dabei können z. B. eine konstante Masse beschleunigt oder abgebremst (z. B. Bankdrücken – isoinertiale Methode), eine statische Position gegen Widerstand oder Schwerkraft gehalten (z. B. Kniebeugstellung – isometrische Methode), oder Bewegungen in konstanter Geschwindigkeit ausgeführt werden (z. B. Kniebeugen – isokinetische Methode). Gemessen wird z. B. die bewältigte Masse (kg), die Anzahl der Wiederholungen, oder die Kraft, die auf die Kraftmessplatte wirkt (Maier et al., 2015).

Leistungsphysiologische Parameter finden aber auch in der Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik Anwendung. Dabei werden im Fußball unter anderem einfache motorische Tests, Biomarker, Ruhepuls etc. verwendet (Tab. 5). Beispielsweise können Sprint-, Sprung- und Maximalkrafttests Rückschlüsse auf die muskuläre Ermüdung liefern, während Laborparameter wie CK und CRP mit akuten muskulären Mikrotraumata nach sportlicher Belastung einhergehen (Ndlec et al., 2012).

Tab. 5: Übersicht häufig angewandter Parameter zur Ermüdungs- bzw. Erholtheitsdiagnostik im Fußball (modifiziert nach Meyer et al., 2013, S. 30)

Kategorie	Verfahren	Vorteile	Nachteile	Bemerkungen
Einfache motorische Testverfahren	Sprinttest (Maximal-)Krafttest Sprungtest	Einfach und wiederholt anwendbar	Bildet nur eine kleine Komponente des Fußballs ab	Studien: Nicht sensitiv für fußballtypische Schwankungen der Saisonbelastung
Laborwerte	CK	Günstig, kapillär bestimmbar	Bildet nur mechanisch-muskuläre Beanspruchung ab	Auch durch fußballtypische Belastung erhöht
	Harnstoff	Günstig, kapillär bestimmbar	Bildet nur Stoffwechselbeanspruchung ab	Fußball hinreichend katabol für Anstiege?
	Entzündungsparameter z. B. CRP, IL-6	Misst anderweitig kaum zugängliche Komponente	Verfälschung durch andere Entzündungen	Entzündung Stimulus für spätere Trainingseffekte?
	Hormone	Unmittelbarer Blick auf Stoffwechsellage	Zirkadiane Rhythmik, teilweise teuer	Aus Übertrainings-Diagnostik entlehnt
	Glutamin/ Glutamat	Einblick in Katabolismus	Teuer, kein Routineparameter	Noch eher experimentell
Psychometrie	RPE, EBF-Sport, POMS, TQR, DALDA, DOMS	Potentiell integrativ, günstig, z. T. schnell	Durch Sportler verfälschbar	Wiederholte Anwendung mit „Ermüdungseffekten“
Ergänzende Verfahren	Ruhe-Herzfrequenz, HFV	Einfache und präzise Messbarkeit; direkte Messung der vegetativen Regulation	Fragliche Spezifität für Ermüdungsprozesse; Vielfalt der HRV-Parameter	Uneinheitliche Studienlage
	HF-Abfall, Doppeltests	Direkte Messung der Erholungsfähigkeit	Hohe Belastung durch Test in Phasen hoher Beanspruchung unerwünscht	Bestimmung weiterer Parameter erforderlich (z. B. Hormone)
	Psychomotorische Geschwindigkeit	Misst „logische“ Komponente, die der Ermüdung unterliegt	Vermutlich durch anderweitige Ermüdung beeinträchtigt	Bislang keine Anwendung im Fußball

Da im Fußball ein großer Bedarf an zuverlässigen Ermüdungsparametern besteht, werden regelmäßig neue Verfahren untersucht, welche möglicherweise einen neuen Goldstandard in der Ermüdungsdiagnostik etablieren können. Neben motorischen und psychometrischen Testverfahren nehmen hier Biomarker eine wichtige Rolle ein. Der theoretische Hintergrund von den in dieser Studie verwendeten Laborparametern ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

Biomarker in der Ermüdungsdiagnostik

Biomarker wie Proteine, Metaboliten und Hormone haben in der Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik einen hohen Stellenwert erlangt (Lee et al., 2017). Sie bieten eine objektive und gut reproduzierbare Möglichkeit des Beanspruchungsmonitorings (Meyer et al., 2013) und können unter anderem Informationen über Fitnesslevel, Muskelschädigungen, Wasserhaushalt, Entzündungen und Übertraining liefern (Palacios et al., 2015). Die Schwierigkeit bei der Interpretation von Biomarkern ist jedoch die geringe Sensitivität sowie die große interindividuelle Variation (Lee et al., 2017). So können beispielsweise Trainingsstatus, Ermüdungszustand, Art, Dauer und Intensität der Belastung, Alter, Geschlecht und klimatische Bedingungen Einfluss auf die Serumkonzentrationen haben. Da zudem kein Goldstandard existiert, wird eine Kombination mehrerer Biomarker empfohlen. Die Referenzwerte (Tab. 6) müssen dabei differenziert betrachtet werden, da Leistungssportler oft stark erhöhte Werte aufweisen (Palacios et al., 2015). In einer umfangreichen Studie mit Profifußballern aus der 1. und 2. Bundesliga ergaben sich jedoch nur für die Laborparameter CK (Kreatinkinase) und Hämatokrit relevante belastungsabhängige Veränderungen, die klinische Relevanz zeigten (Meyer und Meister, 2011). Insbesondere exzentrischen Belastungen, wie sie häufig beim Fußball vorkommen (z. B. Landung nach Sprung), führen zu starker muskulärer Belastung mit Mikroschädigungen, was zu einem starken Anstieg von Muskelenzymen führt (Ispirlidis et al., 2008).

Tab. 6: Referenzwerte ausgewählter Laborparameter (American Board of Internal Medicine, 2021, S. 4, 7)

Laborparameter	Referenzbereich
CK (Kreatinkinase)	55 – 170 U/l
CRP (C-reaktives Protein)	≤ 0,8 mg/dl
IGF-1 (<i>Insulin-like growth factor 1</i>)	182 – 780 ng/ml
LDH (Laktatdehydrogenase)	80 – 225 U/l

CK

Die Kreatinkinase (CK) ist ein Enzym, das unter anderem in der Skelettmuskulatur vorkommt und zur anaeroben alaktaziden Energiebereitstellung dient, indem es die Regeneration von ATP durch Phosphatgruppenübertragung von Kreatinphosphat auf ADP katalysiert (Brancaccio et al., 2007). Sie ist ein häufig verwendeter Laborparameter in der Sportmedizin und ist unter anderem ein Indikator für Mikroverletzungen der Skelettmuskulatur, wie sie insbesondere nach intensivem Training (vor allem Kraft- und Schnellkrafttraining) vorkommen (Meyer et al., 2013). Der Anstieg der CK und anderer Muskelenzyme ist möglicherweise bedingt durch eine erhöhte Permeabilität der Muskelzellmembran (Cannon et al., 1990). Durch Anpassungsmechanismen zeigen

trainierte Sportler generell einen weniger starken Anstieg der CK als Untrainierte (Maxwell und Bloor, 1981), doch sind bei professionellen Fußballspielern häufig stark erhöhte Werte feststellbar (Meyer und Meister, 2011). Sind die CK-Werte grundsätzlich erhöht, kann dies auch ein Anzeichen für muskuläre Verletzungen oder Übertraining sein (Palacios et al., 2015). Auch eine insuffiziente Erholung steht in Verbindung mit chronisch erhöhten Werten (Lee et al., 2017). Der CK-Anstieg erfolgt typischerweise 24 bis 36 Stunden nach intensivem Training (Nowakowska et al., 2019) und kann bis zu sieben Tage anhalten (Lee et al., 2017). Die stärksten Anstiege sind nach exzentrischen Belastungen (Bergablaufen, Landung nach Sprung) zu verzeichnen, mit Peak-Werten nach ca. 96 Stunden (Brancaccio et al., 2010).

CRP

Das C-reaktive Protein (CRP) ist ein Akute-Phase-Protein, welches hauptsächlich in der Leber synthetisiert wird und bei Entzündungsprozessen im Körper ansteigt. Die Genexpression wird durch inflammatorische Zytokine, insbesondere Interleukin-6 (IL-6), stimuliert und führt vor allem bei bakteriellen Infektionen zu stark erhöhten Serumkonzentrationen (Sproston und Ashworth, 2018).

Da Muskelschädigungen oft mit Entzündungsprozessen einhergehen, kann ein intensives Training mit einem erhöhten CRP-Wert einhergehen (Meyer et al., 2013). Auch hier gibt es Anpassungsvorgänge in trainierten Athleten, sodass der CRP-Wert generell niedriger ist, als bei Nicht-Sportlern. Ein erhöhter Wert kann bei Athleten auch auf ein Übertraining oder eine fehlende Anpassung an Trainingsbelastungen hinweisen (Palacios et al., 2015).

LDH

Die Laktatdehydrogenase (LDH) katalysiert die Reduktion von Pyruvat zu Laktat am Ende der anaeroben Glykolyse und kommt in Form verschiedener Isoenzyme in den meisten Körpergeweben vor (Miao et al., 2013). Nach intensiven Trainingseinheiten erfolgt, wie auch bei der CK und Myoglobin, ein physiologischer Anstieg der LDH-Konzentration im Blut, wobei erhöhte Werte auch auf Muskel-, bzw. Muskelfaserschädigungen hinweisen können (Palacios et al., 2015). Ähnlich wie bei anderen Muskelenzymen steigt die Konzentration vor allem bei exzentrischer Muskelkontraktion an und LDH zusammen mit anderen Biomarkern (AST, CK, Kreatinin) erwies sich als ein sinnvoller Parameter zur Diagnostik der Erholungsdauer (Nowakowska et al., 2019).

IGF-1

Ein etwas seltener angewandter Laborparameter zur Ermüdungsdiagnostik ist der *insulin-like growth factor 1* (IGF-1), auch Somatomedin C genannt. Die Synthese dieses Peptidhormons in den Hepatozyten der Leber wird durch das Wachstumshormon (GH) induziert und weist eine strukturelle Ähnlichkeit zu Insulin auf (daher „*insulin-like*“). IGF-1 ist vor allem für die Regulierung von Wachstum, Proteinmetabolismus und Glukoseaufnahme in die Zelle verantwortlich (Álvarez-Nava und Lanes, 2017).

Während die Ausschüttung von Wachstumshormon deutlich mit der Dauer und Intensität von physischer Belastung und Beanspruchung korreliert (Lee et al., 2017), sind die Ergebnisse zur Serum-IGF-1-Konzentration in Abhängigkeit von Trainingsstimuli widersprüchlich. Sowohl erhöhte, als auch erniedrigte IGF-1-Werte wurden nach regelmäßigem Training beobachtet (Frystyk, 2010). Andererseits konnte bei chronisch erniedrigten Konzentrationen eine Verbindung zu Überlastungszuständen (*overreaching*) gefunden werden (Lee et al., 2017).

2 Zielstellung

Durch den hohen Leistungsdruck im Fußball sind die Spieler einer enormen Belastung und Beanspruchung ausgesetzt, welche mit einer erhöhten Verletzungsinzidenz assoziiert sind. Dies führt zu häufigen Ausfällen von Spielern und ist mit hohen Kosten für die Gesellschaft verbunden, wie einleitend bereits beschrieben. Ziel sollte es daher sein, stark beanspruchte Spieler zu schonen sowie die Belastbarkeit der Spieler durch suffiziente Trainingsprogramme zu erhöhen und somit Verletzungen vorzubeugen. Dies bedarf einer validierten Ermüdungsdiagnostik, die möglichst ökonomisch, zuverlässig und ohne großen Aufwand betrieben werden kann. Bisher konnte jedoch kein Parameter identifiziert werden, der diesen Ansprüchen vollumfänglich gerecht wird.

Da wissenschaftliche Studien zur Ermüdungsdiagnostik im Hochleistungssport aufgrund des hohen Trainings- und Wettkampfpensums nur schwer durchführbar sind, besteht gerade hier ein großer Forschungsbedarf. Herkömmliche Methoden bieten meist keine ausreichende Sensitivität und Spezifität und stellen teilweise eine zusätzliche physische Belastung dar. Daher müssen bisherige Belastungs- und Beanspruchungsparameter kombiniert werden, was einen großen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand bedeutet. Den Erholtheitszustand durch neue Verfahren zu untersuchen ist somit eine wichtige Aufgabe für den Leistungssport.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, mögliche Beziehungen zwischen physischer Belastung und leistungsphysiologischen Parametern zu untersuchen. Darüber hinaus galt es, die Aussagekraft einiger „neuer“ Parameter, die bisher in derartigen Fragestellungen nur begrenzt zum Einsatz kamen, zu prüfen. Die Beurteilung der Auswirkungen der kumulativen physischen Belastung sowie der Aussagekraft und Eignung der eingesetzten Diagnostikmethoden sind dabei die zentralen Fragestellungen und zugleich auch der größte Mehrwert dieser Dissertation.

Die folgenden Fragestellungen wurden in der vorliegenden Arbeit, die explorativen Charakter trägt, untersucht:

1. Führen hohe Spielbelastungen zu relevanten Veränderungen der untersuchten Laborparameter (CK, CRP, LDH, IGF-1), der posturalen Stabilität (WDI, PC) und/oder der Reaktivkraft (Drop Jumps)?
2. Bestehen relevante Korrelationen zwischen leistungsphysiologischen Parametern und der kumulativen Spielbelastung bzw. der Spielbelastung innerhalb der letzten acht Tage?
3. Bestehen relevante Korrelationen zwischen Laborwerten, Sprunghöhe und posturaler Stabilität?
4. Wie verändern sich die leistungsphysiologischen Parameter über den Saisonverlauf?

3 Material und Methodik

3.1 Projektplanung und Studiendesign

Es wurden insgesamt 21 Spieler der U17 Fußballmannschaft des Halleschen FC von Juli 2017 bis Juni 2018 für eine explorative Studie zur kumulativen Ermüdung über den Saisonverlauf untersucht. Für jeden Spieler gab es insgesamt vier Messzeitpunkte (MZP), an denen verschiedene Parameter zur Ermüdungsdiagnostik (Tab. 7) unter ärztlicher Aufsicht in der Sportklinik Halle erhoben worden sind. Zu Beginn jedes MZP wurden zudem anthropometrische Daten (Größe, Gewicht, BMI) der Spieler ermittelt. Die Untersuchungen begannen morgens um acht Uhr und endeten mit dem letzten Spieler um ca. 13 Uhr. Es wurden insgesamt zehn bis elf Probanden pro Untersuchungstag einbestellt, wobei für jeden Athleten 60 Minuten eingeplant waren. Die Untersuchungen überschritten sich, sodass jeweils nach 30 Minuten mit dem nächsten Spieler begonnen werden konnte. Zusätzlich waren die Sportler dazu angehalten, einen wöchentlichen Fragebogen bezüglich ihrer psychophysischen Verfassung auszufüllen sowie ein wöchentliches Trainingstagebuch zu führen. Sowohl Fragebögen, als auch Trainingstagebücher wurden jedoch bereits nach sechs bzw. vier Monaten eingestellt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnte ein 5. MZP nicht durchgeführt werden. Ein Ersatztermin war wegen der hohen Spieldichte nicht möglich. Die Auswertung der Elektromyographie-Daten (Tab. 7) sind Untersuchungsgegenstand einer anderen Dissertation und wurden daher in dieser Arbeit nicht verwendet. Abb. 8 gibt einen Überblick über die zeitliche Abfolge der Untersuchungen.

Zur Objektivierung der Belastung wurden die Spiele bilanziert und Einsatzzeiten der Spieler herausgearbeitet. Die Spielzeiten dienten als quantitative Belastungsparameter, welche mit den gemessenen leistungsphysiologischen Parametern verglichen werden sollten. Der genaue Ablauf der einzelnen Messungen und die erhobenen leistungsphysiologischen Parameter sind im Folgenden beschrieben.

Tab. 7: Abfolge der durchgeführten Untersuchungsmethoden und deren Parameter.

Untersuchungsmethode (chronologisch)	Untersuchte Parameter
1. Blutentnahme	CK, CRP, IGF-1, LDH
2. REGman-Fragebogen	Subjektive Wahrnehmung des mentalen und körperlichen Zustands
3. Posturographie (IBS)	Posturale Stabilität und Regulation, Gewichtsverteilung, Fußkoordination
4. Drop Jumps	Sprunghöhe
5. Elektromyographie (EMG) des Schussbeins	Spannungssignale, MUAPs

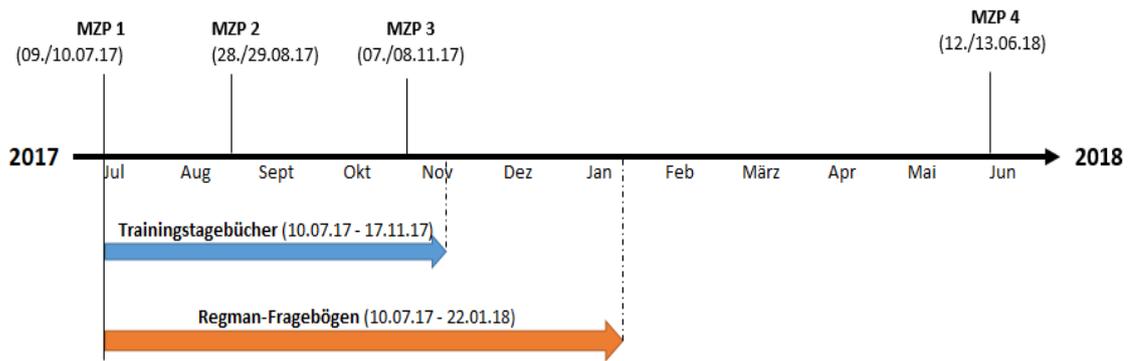


Abb. 8: Überblick über die Untersuchungsplanung. Es gab insgesamt vier Messzeitpunkte (MZP) über die gesamte Saison verteilt. Die Studie begann am 09./10.07.2017 und endete am 12./13.06.2018. Trainingstagebücher wurden bereits nach vier, REGman-Fragebögen nach sechs Monaten nach Studienbeginn eingestellt. Zwischen MZP 3 und 4 lag ein Zeitraum von sieben Monaten, da ein 5. MZP ausgefallen war.

3.2 Untersuchungsstichprobe

An der Untersuchung nahm die U17 B-Jugend Fußballmannschaft des Halleschen FC teil ($n = 21$). Es wurden ausschließlich Feldspieler in die Studie eingeschlossen, da Torhüter ein deutlich abweichendes Beanspruchungsprofil vorweisen (Bangsbo et al., 2006; Di Salvo et al., 2008). Spieler, die in mindestens einem der ersten drei MZP unvollständige Daten aufwiesen, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Dadurch reduzierte sich die Teilnehmerzahl von $n = 14$ (MZP 1 und 2) auf $n = 11$ zum MZP 3. Die Probanden hatten zum Zeitpunkt des Studienbeginns (09./10.07.2017) ein Alter von 15,4 ($\pm 0,6$) Jahren, eine Körpergröße von 1,77 ($\pm 0,05$) m, ein Gewicht von 64,8 ($\pm 4,7$) kg und einen BMI von 20,6 ($\pm 1,5$) kg/m^2 . Die Fußballmannschaft absolvierte insgesamt 21 Spiele zwischen dem 1. und dem 3. MZP (acht Spiele zwischen MZP 1 und 2; 13 Spiele zwischen MZP 2 und 3; Abb. 9).

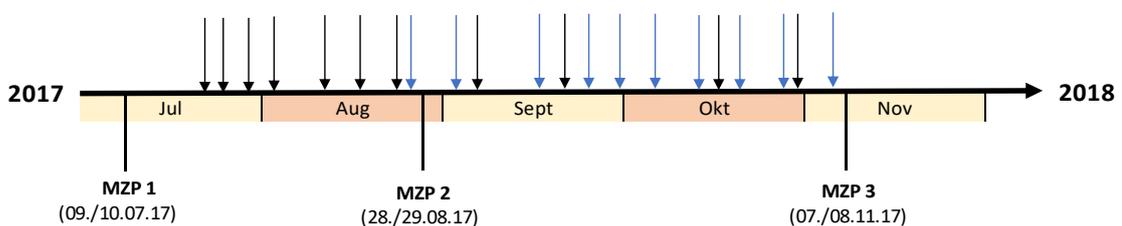


Abb. 9: Spiele (dargestellt als Pfeile) der U17 B-Jugend Fußballmannschaft des HFC zwischen dem 1. und dem 3. MZP; schwarz = Freundschaftsspiel, blau = Regionalligaspiel.

3.3 Messmethoden

3.3.1 Blutentnahme

Die Blutentnahme erfolgte zu Beginn jedes MZP durch periphere Venenpunktion der V. mediana cubiti, durchgeführt von einer medizinischen Fachangestellten der Sportklinik Halle. Die Athleten waren bei der Blutentnahme nicht nüchtern. Die Proben wurden anschließend innerhalb von 20 Minuten im Labor zentrifugiert und quantitativ auf die Parameter CK, CRP, IGF-1 und LDH untersucht. Am MZP 1 wurde zusätzlich die Serumkonzentration von Vitamin B12, D und Ferritin bestimmt. Zu Beginn jedes Messtages wurde bei den Probanden eine Blutprobe entnommen.

3.3.2 Fragebögen und Trainingstagebücher

Die Sportler waren angehalten, einmal pro Woche einen Fragebogen auszufüllen sowie ein tägliches Trainingstagebuch zu führen.

Die Trainingstagebücher dienten der Erfassung körperlicher Beanspruchung, der Trainingsintensität und -häufigkeit sowie der Schlafdauer der Spieler. Die körperliche Beanspruchung wurde für jede Trainingseinheit und jedes Spiel auf einer Skala von 6 (sehr leicht) bis 20 (sehr anstrengend) bewertet (Anlage 1). Zudem wurde die Beanspruchung durch Spiele und eventuelle Anfahrten dorthin sowie die Spieldauer erfasst. Die Dokumentation erfolgte täglich ab Studienbeginn (10.07.2017) und wurde am 17.11.2017 eingestellt.

Für den wöchentlichen Fragebogen wurde der AEB-Fragebogen (Akutmaß Erholung und Beanspruchung) des REGman-Forschungsteams (Regenerationsmanagement im Sport) verwendet. Dieser psychometrische Fragebogen enthält eine Liste von 32 Adjektiven, die vom Athleten auf einer Skala von 0 (gar nicht zutreffend) bis 6 (voll zutreffend) bewertet werden mussten (Anlage 2). Dabei sollten unter anderem körperliche und mentale Leistungsfähigkeit, emotionale Ausgeglichenheit und der allgemeine Erholungszustand erfasst werden. Die Fragebögen wurden immer montags vor der ersten Trainingseinheit bzw. nach der Blutentnahme an Messtagen ausgefüllt. Die Dokumentation der AEB-Fragebögen begann am 10.07.2017 und wurde am 22.01.2018 eingestellt.

Da sowohl REGman-Fragebögen, als auch Trainingstagebücher große Lücken in der Vollständigkeit aufwiesen, konnten sie nicht zum Beanspruchungsmonitoring verwendet werden. Die fehlenden Daten hätten zu falschen Ergebnissen führen können, weshalb auch keine Teilauswertung durchgeführt wurde.

3.3.3 Posturographie (IBS)

Die Posturographie (engl. Posture = Haltung) ist eine Methode zur Messung der Gleichgewichtskontrolle (Stockwell, 1981) und findet unter anderem in der Diagnostik von Gleichgewichtsstörungen oder zum Monitoring von Behandlungserfolg Verwendung (Schwesig et al., 2014). Für diese Studie wurde das Interaktive Balance System (IBS; neurodata, Wien, Österreich) als Messverfahren verwendet. Dieses besteht aus zwei Kraftmessplatten, die in einem nach vorne hin offenen 30°-Winkel angeordnet sind und jeweils eine vordere (Vorfuß) und eine hintere (Ferse) Kraftmessplattform enthalten (Abb. 10a). Dadurch können die Vertikalkräfte von Vor- und Rückfuß separat gemessen und in Beziehung zueinander gesetzt werden, was wiederum eine gezielte Messung von Schwankungen des Körperschwerpunktes ermöglicht (Schwesig et al., 2006). Zusätzlich kann das System durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) die Kraft-Zeit-Signale in Frequenzspektren (Spektrogramme) überführen und so zu einer Beurteilung der posturalen Subsysteme beitragen (Abb. 11) (Seiwerth et al., 2020). Die Frequenzspektren sind in acht Frequenzbereiche unterteilt, welche sich wiederum in vier Frequenzbänder (F1, F2–4, F5–6, F7–8) einteilen lassen. Die Frequenzbänder geben wiederum Rückschlüsse auf das zugrundeliegende posturale Subsystem (Tab. 8) (Schwesig et al., 2014). Durch die Beurteilung der beanspruchten posturalen Subsysteme kann das IBS auch bei identischer Stabilitätsmessung eine mögliche Kompensation detektieren. Sind beispielsweise Defizite in einem posturalen Subsystem vorhanden (z. B. visuelles System), kann dieses durch andere Systeme (z. B. somatosensorisches System) kompensiert werden (Modell der selektiven kompensatorischen Optimierung; Schwesig et al., 2006).

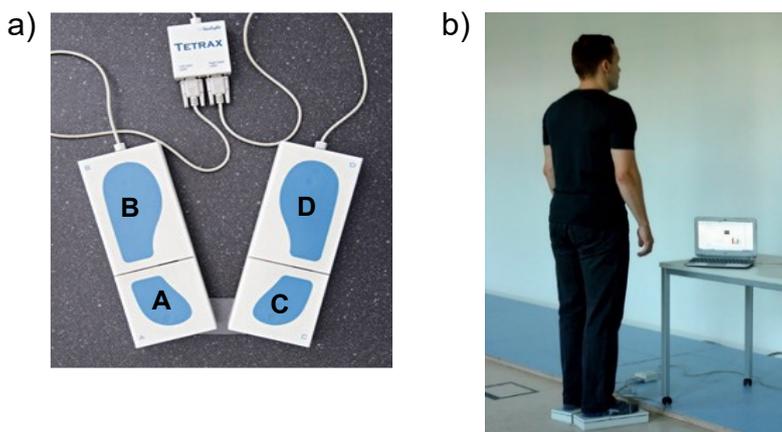


Abb. 10a–b: Kraftmessplatten des IBS. Die Messplatten bestehen aus vier einzelnen Kraftmessplattformen (A, B, C, D), die in einem nach vorne hin offenen Winkel aufgestellt werden (**a**). Die Testperson stellt sich für die Messung mit beiden Füßen auf die Messplatten. Die Knie sind während der Messung gestreckt, die Arme hängen locker nach unten, der Kopf ist zunächst gerade (**b**).

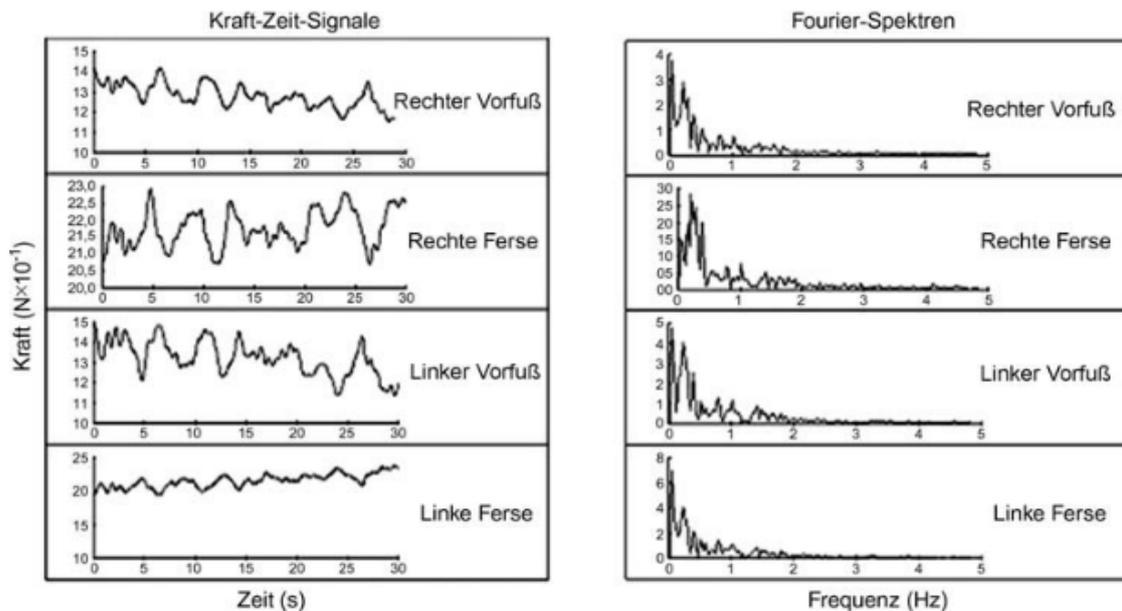


Abb. 11: Umwandlung der Kraft-Zeit-Signale in Spektrogramme (Amplituden und Frequenzen) mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) (Schwesig et al., 2009, S. 351)

Tab. 8: Frequenzbereiche nach FFT und primär geforderte posturale Subsysteme (modifiziert nach Schwesig et al., 2006, S. 376)

Bezeichnung	Frequenz	Posturale Subsysteme	Frequenzband
F1	0,03–0,1 Hz	Visuell und nigrostriatal	F1
F2	0,1–0,25 Hz	Peripher-vestibulär	F2-4
F3	0,25–0,35 Hz		
F4	0,35–0,5 Hz		
F5	0,5–0,75 Hz	Somatosensorisch	F5-6
F6	0,75–1,0 Hz		
F7	1,0–3,0 Hz	Zerebellär	F7-8
F8	> 3,0 Hz		

Zusätzlich zur Frequenzanalyse errechnet die Tetrax-Software des IBS fünf Produktparameter (Tab. 9). Für diese Studie wurden lediglich der Stabilitätsindikator (ST) und der Gewichtsverteilungsindex (WDI) betrachtet, da diese die posturale Stabilität widerspiegeln.

Tab. 9: Parameter des motorischen Outputs (Produktparameter) (Seiwerth et al., 2020, S. 346)

Parameter	Beschreibung
Stabilitätsindikator (ST)	Gibt den Zustand der posturalen Stabilität an. ST berechnet sich aus der Quadratwurzel der Summe der quadrierten Differenzen zweier unmittelbar benachbarter Druckschwankungssignale (<i>Root mean square of successive differences</i>). Je größer der ST, desto größer die Instabilität.
Gewichtsverteilungsindex (WDI = <i>weight distribution index</i>)	Beschreibt die Asymmetrie der Gewichtsverteilung auf die 4 Platten (A,B,C,D) bei einer gleichmäßig erwarteten Verteilung (25% je Platte). Je größer der WDI, desto größer die Instabilität.
Synchronisation (Synch)	Verhältnis der Schwingungsmuster der vier Platten zueinander: Es werden alle sechs Kombinationsmöglichkeiten der vier Platten zueinander verglichen (Platte A/B, B/C, C/D, A/C, A/D, B/D). Hieraus ergibt sich ein Indikator für die Fußkoordination. Die Berechnung erfolgt durch skalare Multiplikation: 1000 = vollständige Koaktivität (A/C, B/D) -1000 = vollständige Kompensation (A/B, B/C, C/D, A/D) 0 = keine Koaktivität oder Kompensation
Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)	Prozentuale anterior-posteriore Gewichtsverteilung von Vorfuß vs. Rückfuß unter Angabe der Rückfußbelastung
Seitigkeit (Left)	Prozentuale mediolaterale Gewichtsverteilung rechts vs. links unter Angabe der linksseitigen Belastung

Die Messungen erfolgten ohne Schuhe und wurden in vier verschiedenen Positionen für jeweils 32 Sekunden durchgeführt (Positionen 1–4, Tab. 10). Der Proband wurde dazu aufgefordert, die entsprechende Position einzunehmen und möglichst ruhig, locker und ohne zu sprechen auf der Messplatte zu stehen (Abb. 10b). Die Augen waren in den Positionen 2 und 4–8 geschlossen. Nur die Positionen 1 und 3 erfolgten mit geöffneten Augen. Hierbei waren die Probanden angehalten, einen Punkt auf Augenhöhe zu fixieren. Positionen 3 und 4 erfolgten mit zusätzlichen Schaumstoffkissen (*foam pads*) auf den Kraftmessplatten, welche einen ruhigen Stand erschweren sollten. Die Positionen 5–8 (Tab. 10) kamen bei der Untersuchung nicht zum Einsatz. Für die Auswertung wurde gezielt die Position „PC“ (mit Schaumstoffkissen, Augen geschlossen) betrachtet, da so der visuelle Input fehlte und so das somatosensorische System stärker beansprucht wurde. Die Daten wurden an einen verbundenen Auswertungsrechner übertragen und in der dazugehörigen Analysesoftware ausgewertet.

Tab. 10: Testpositionen beim IBS (Schwesig et al., 2014, S. 17)

Positionsbezeichnung	Augen	Schaumstoff	Kopfhaltung
1. NO (Normal stand, O pen eyes)	Geöffnet	Ohne	Gerade
2. NC (Normal stand, C losed eyes)	Geschlossen	Ohne	Gerade
3. PO (on foam P ads, O pen eyes)	Geöffnet	Mit	Gerade
4. PC (on foam P ads, C losed eyes)	Geschlossen	Mit	Gerade
5. HR (Head R ight)	Geschlossen	Ohne	45° nach rechts rotiert
6. HL (Head L eft)	Geschlossen	Ohne	45° nach links rotiert
7. HB (Head B ack)	Geschlossen	Ohne	Reklination
8. HF (Head F orward)	Geschlossen	Ohne	Anteversion

3.3.4 Drop Jumps

Nach der Posturographie erfolgte zunächst eine fünfminütige Erwärmung auf dem Laufband sowie eine zweiminütige Sprungerwärmung. Anschließend wurden die Drop Jumps im *Speed Court* durchgeführt. Dabei nahmen die Athleten eine stehende Position auf einer 30 cm messenden Erhöhung ein mit in die Hüften gestemmtten Händen (Abb. 12a). Es folgte ein Schritt nach vorne (Abb. 12b) mit Herabfallen von der Erhöhung, gefolgt von einem möglichst kurzen und explosiven Prellsprung bei Kontakt mit der Kraftmessplatte (Abb. 12c). Ziel dabei war es, einen maximal kurzen Bodenkontakt bei gleichzeitig maximaler Sprunghöhe zu erreichen. Zunächst durfte jeder Spieler einen Probesprung absolvieren, anschließend wurden die Messungen in drei verschiedenen Positionen durchgeführt. Die Reihenfolge der Sprünge ist in Tab. 11 dargestellt. Jede Position wurde dreimal hintereinander gemessen (dreimal beidbeinig, dann dreimal mit dem Schussbein, dann dreimal mit dem anderen Bein). Die Hände blieben dabei zu jeder Zeit an den Hüften und durften nicht zur aktiven Unterstützung genutzt werden. Knie und Hüften mussten vom Absprung bis zur Landung gestreckt bleiben. Erfasst wurden die Parameter Kontaktzeit, Flugzeit und Sprunghöhe (berechnet aus Flugzeit), wobei für die Auswertung nur die Sprunghöhe verwendet wurde. Kontaktzeit und Flugzeit sind Bestandteil einer anderen wissenschaftlichen Arbeit. Die Messung der Drop Jumps nahm etwa 15 Minuten in Anspruch.



Abb. 12a–c: Durchführung der Drop Jumps. Zunächst wurde die Ausgangsposition auf einer Erhöhung eingenommen (a). Als nächstes folgte ein Schritt nach vorne (b) mit Herabfallen von der Erhöhung, gefolgt von einem reaktiven Absprung von der Kraftmessplatte (c) (Maier et al. 2015, S. 55)

Tab. 11: Chronologische Abfolge der Drop Jumps

Sprungpositionen (chronologisch)	Anzahl der Sprünge
1. Probesprung	1
2. Beidbeinig	3
3. Einbeinig mit dem Schussbein	3
4. Einbeinig mit dem anderen Bein	3

3.4 Statistische Datenanalyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software SPSS Version 28 (IBM, Armonk, NY, USA).

In der gesamten Studie wurden insgesamt 62 Laborwerte, 71 Posturographie-Datensätze und 69 Sprungdaten erhoben (Tab. 12). Nach Ausschluss des 4. MZP und der Spieler mit lückenhaften Datensätzen in mindestens einem der ersten drei MZP blieben noch insgesamt 33 Laborwerte, 33 Posturographie-Datensätze sowie 33 Sprungdaten zur Auswertung übrig (Tab. 13).

Tab. 12: Anzahl aller erhobenen Datensätze bei n = 21 unter Einbeziehung des 4. MZP

	MZP1	MZP2	MZP3	MZP4	Gesamt
Labor	14	15	20	13	62
IBS	17	20	18	16	71
Drop Jumps	17	20	16	16	69

Tab. 13: Anzahl aller verwendeten Datensätze nach Ausschluss des 4. MZP und von Spielern mit fehlenden Datensätzen

	MZP1	MZP2	MZP3	Gesamt
Labor	11	11	11	33
IBS	11	11	11	33
Drop Jumps	11	11	11	33

Zur Prüfung auf Normalverteilung wurde der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt. Die Laborwerte sowie der WDI (PC) wurden anschließend als nicht-normalverteilt behandelt, da jeweils an mindestens einem MZP die Nullhypothese („die Stichprobe ist normalverteilt“) auf einem Testniveau von 5% verworfen werden musste. Der ST (PC) sowie die Sprungdaten zeigten dagegen zu allen drei MZP eine Normalverteilung.

Der statistische Mittelwertvergleich für die Laborwerte und den WDI (PC) erfolgte mittels Friedman- und Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur. Anschließend wurden die Effektgrößen in Form des Pearson Korrelationskoeffizienten („r“) aus der Teststatistik („z“) und der Stichprobengröße („n“) berechnet:

$$r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right|$$

Dabei unterscheidet man kleine ($|0,1| \leq r < |0,3|$), mittlere ($|0,3| \leq r < |0,5|$) und große Effekte ($r \geq |0,5|$) (Cohen, 1988). Um Verwechslungen mit dem Korrelationskoeffizienten r zu vermeiden, werden Effektgrößen, unabhängig von der Berechnungsvorschrift, im Folgenden konsistent mit d angegeben.

Die Sprunghöhen der Drop Jumps und der Stabilitätsindikator (ST) wurden mit der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung auf Mittelwertunterschiede geprüft.

Zur Beschreibung der Parameterverläufe über die Saison wurde die Effektgröße nach Cohen („d“) verwendet. Diese wird, im Gegensatz zum p-Wert, kaum von der Stichprobengröße beeinflusst (Leonhart, 2004) und berechnet sich aus der Differenz der Mittelwerte („M“) dividiert durch die Standardabweichung („SD“) (Cohen, 1982):

$$d = \frac{M_1 - M_2}{SD}$$

Man unterscheidet auch hier kleine ($|0,2| \leq d < |0,5|$), mittlere ($|0,5| \leq d < |0,8|$) und große Effekte ($d \geq |0,8|$). Bei $d < |0,2|$ liegt Cohen (1982) zufolge kein Effekt vor.

Als Standardabweichung wurde die gepoolte Standardabweichung aus beiden Messungen verwendet. Diese errechnet sich aus der Stichprobengröße („n“) und der Standardabweichung („SD“) der beiden zu vergleichenden Gruppen (Leonhart, 2004):

$$SD = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)SD_1^2 + (n_2 - 1)SD_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Um einen Zusammenhang zwischen körperlicher Belastung und den erhobenen Parametern zu untersuchen, wurden die Einsatzzeiten der Spieler mit den Laborwerten, posturographischen Parametern und Sprunghöhen mittels Produkt-Moment-Korrelation korreliert und relevante Korrelationen ($r > |0,5|$) anschließend graphisch dargestellt. Die erhobenen Parameter wurden dazu prozentual in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus (MZP 1) angegeben. So konnten ausschließlich die individuellen Parameter-Responses über den Saisonverlauf mit der erfahrenen Spielbelastung verglichen werden, da keine Absolutwerte betrachtet wurden.

Die Stichprobengröße betrug, bereinigt um alle fehlenden Werte bzw. Datensätze, $n = 11$, wobei im Falle von LDH ein Ausreißer ausgeschlossen werden musste, sodass sich die Stichprobengröße nochmals auf $n = 10$ verringerte. Der kritische r-Wert der Pearson-Korrelationsanalyse auf einem Signifikanzniveau von 5% beträgt 0,602 ($n = 11$) bzw. 0,632 ($n = 10$) (Willimczik und Höner, 1997). Korrelationen können Cohen (1982) zufolge in gering/ schwach ($|0,1| \leq r < |0,3|$), moderat/ mittel ($|0,3| \leq r < |0,5|$) und groß/ stark ($r \geq |0,5|$) unterschieden werden.

4 Ergebnisse

Normalverteilung der Daten

Spielzeit

Sowohl die Spielzeiten innerhalb der letzten acht Tage vor einem MZP (= 8-Tage-Spielzeit), als auch die Gesamtspielzeiten zwischen zwei MZP (= Intervallspielzeit) waren normalverteilt ($p > 0,05$).

Laborparameter

Bei allen Laborparametern (CK, CRP, LDH, IGF-1) lag zu mindestens einem der drei MZP keine Normalverteilung vor ($p < 0,05$). Für den statistischen Mittelwertvergleich wurden daher alle Laborparameter als nicht-normalverteilt behandelt.

Posturographie

Der WDI (PC) zeigte zum MZP 2 keine Normalverteilung auf ($p < 0,05$), während der ST (PC) zu allen drei MZP normalverteilt war ($p > 0,05$).

Drop Jumps

Die Sprunghöhen der Drop Jumps waren zu allen drei MZP normalverteilt ($p > 0,05$).

4.1 Spielbelastung

Die kumulative Spielzeit zwischen zwei Messzeitpunkten (= Intervallspielzeit) sowie der letzten acht Tage vor einem MZP (= 8-Tage-Spielzeit) wurden jeweils mit den Ermüdungsparametern verglichen. Als Grundlage für die nachfolgenden Ergebnisse wurde daher zunächst die Spielbelastung in der Teilsaison dargestellt (Abb. 13).

Insgesamt war die Anzahl der Spielminuten im 2. Intervall (MZP 2–3) deutlich höher als im 1. Intervall (MZP 1–2). Während die Spieler im 2. Intervall durchschnittlich 538 Minuten spielten, waren es im 1. Intervall nur 276 Minuten (Abb. 13a). Auch die Medianspielzeiten wichen stark voneinander ab (514 min vs. 337 min). Demgegenüber steht jedoch die unterschiedliche Intervalldauer von zehn Wochen im 2. Intervall gegenüber sieben Wochen im 1. Intervall. Dennoch lag die mittlere wöchentliche Spieldauer zwischen MZP 2 und 3 höher als zwischen MZP 1 und 2 (54 vs. 39 min). Das Gleiche gilt für die Anzahl der Spiele pro Woche (1,3 vs. 1,14 Spiele/ Woche). Die Spielzeiten variierten stark zwischen den einzelnen Spielern. Im 1. Intervall lagen sie etwa zwischen 80 und 500 Minuten, im 2. Intervall sogar zwischen 0 und 900 Minuten (inkl. Ausreißer).

Beim Vergleich der 8-Tage-Spielzeit vor MZP 2 und 3 lässt sich ein ähnliches bzw. gleiches Niveau der Mittelwerte (ca. 88 min), Mediane (83 min), Minima (0 min) und Maxima (ca. 165 min) feststellen (Abb. 13b). Dagegen zeigte sich zum MZP 3 eine geringere Streuung der Spielzeiten zwischen 1. und 3. Quartil als zum MZP 2. In beiden Zeiträumen fanden zwei Spiele mit einer Länge von ca. 80 Minuten statt (Abb. 14).

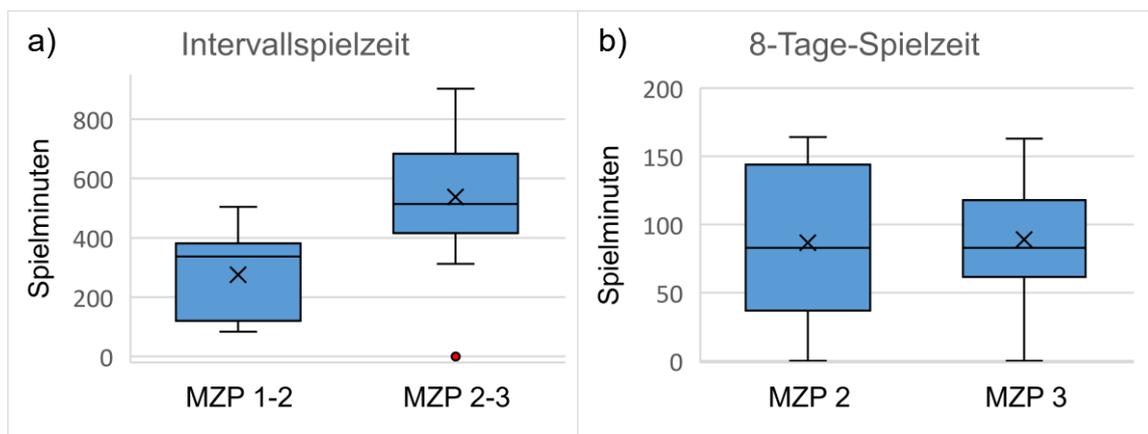


Abb. 13a–b: Kumulative Spielbelastung zwischen zwei MZP (a) bzw. über die letzten acht Tage vor einem MZP (b). Die Spielzeit zwischen MZP 2 und 3 war durchschnittlich höher als zwischen MZP 1 und 2 (a), während die 8-Tage-Spielzeit vor beiden MZP etwa gleich war (b). Der Mittelwert ist als „x“, der Median als Querlinie innerhalb der Box dargestellt. Ober- und Unterkante der Boxen entsprechen dem 3., bzw. 1. Quartil. Die Whisker (Antennen) zeigen Maximum und Minimum, wobei Ausreißer (roter Punkt) ausgenommen sind.

Das letzte Spiel fand jeweils zwei Tage vor einem MZP statt. Beim Vergleich der Abstände der letzten beiden Spiele vor einem MZP zeigt sich jedoch ein deutlicher Unterschied: Während vor dem 2. MZP nur ein freier Tag zwischen den letzten beiden Spielen lag (Abb. 14a), waren es vor dem 3. MZP fünf Tage (Abb. 14b). Die Spieldichte der letzten vier Tage vor MZP 2 war also höher als vor MZP 3. Somit war vor MZP 2 eine geringere Erholungsphase zwischen den Spielen gegeben als vor MZP 3.

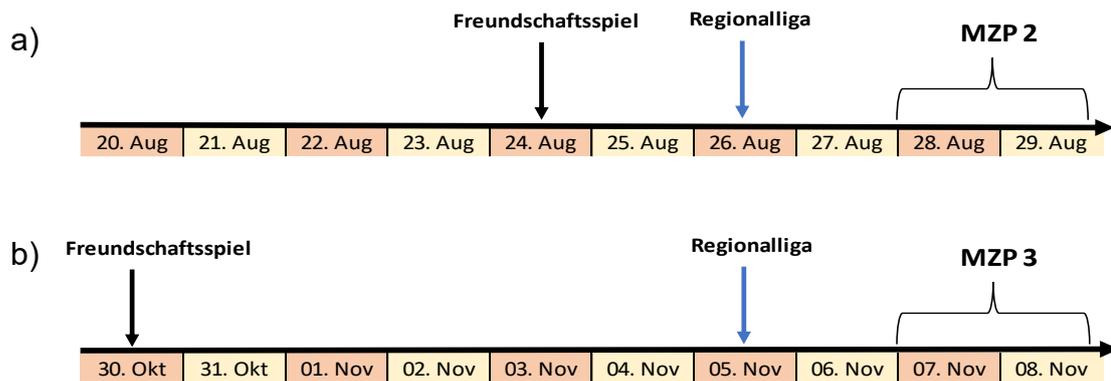


Abb. 14a–b: Fußballspiele der letzten acht Tage vor einem MZP. Vor MZP 2 (a) fand ein Regionalligaspiel zwei Tage und ein Freundschaftsspiel vier Tage vor der Messung statt. Vor MZP 3 (b) fand ein Regionalligaspiel zwei Tage und ein Freundschaftsspiel acht Tage vor der Messung statt. Die Spieler hatten somit eine größere Spielbelastung unmittelbar vor MZP 2.

Zusammenfassend haben die Spieler vor MZP 2 eine geringere Intervallbelastung erfahren als vor MZP 3, jedoch war die Belastungsdichte unmittelbar vor MZP 2 höher als vor MZP 3.

4.2 Laborparameter

Da körperliche Belastung mit einem Anstieg der Laborparameter CK, CRP, LDH und IGF-1 assoziiert ist (Kapitel 1.5), wurden deren Veränderungen über den Saisonverlauf und in Abhängigkeit von der Spielbelastung untersucht. Die zum MZP 1 zusätzlich erhobenen Laborparameter Ferritin, Vitamin B12 und Vitamin D sind in Tab. 14 aufgeführt. Die Probanden befanden sich mit Ausnahme von drei Athleten alle im Referenzbereich. Ein Proband lag mit der Vitamin B12-Konzentration unterhalb des Normbereichs (170 pg/ml), zwei Probanden lagen leicht unter (62 nmol/l) bzw. über (171 nmol/l) dem Normbereich von Vitamin D.

Tab. 14: Ergebnisse der zum MZP 1 erhobenen Laborparameter Vit. B12, Vit. D und Ferritin mit Angabe von Referenzwerten (American Board of Internal Medicine, 2021).

Laborparameter	Mittelwert (\pm SD)	Min-Max	Referenz
Vitamin B12	372 \pm 164 pg/ml	170 – 764 pg/ml	200 – 800 pg/ml
Vitamin D	110 \pm 28 nmol/l	62 – 171 nmol/l	75 – 150 nmol/l
Ferritin	43 \pm 13 μ g/l	30 – 68 μ g/l	24 – 336 μ g/l

Veränderungen über den Saisonverlauf

Besonders bei der CK-Konzentration zeigten sich deutliche Veränderungen über die Saison (Abb. 15a). Von MZP 1 zu 2 ($d = 1,19$) sowie von MZP 1 zu 3 ($d = 1,23$) war ein starker Anstieg zu verzeichnen, während von MZP 2 zu 3 nur ein geringer Anstieg stattfand ($d = 0,40$). Die Streuung nahm ebenfalls über den Saisonverlauf zu. Während zum MZP 1 die Werte noch zwischen ca. 50 und 400 U/l (inkl. Ausreißer) lagen, ließen sich zum MZP 3 Werte zwischen ca. 100 und 1000 U/l beobachten. Beim Vergleich zwischen MZP 2 und 3 fällt auf, dass der Minimalwert an beiden Messungen etwa gleichauf bei ca. 100 U/l lag, während der Maximalwert zum MZP 3 etwa 300 U/l höher war als zum MZP 2 (979 U/l vs. 658 U/l). Der Mittelwert lag zu allen MZP nahe dem Median.

Der Verlauf des CRP war von starken Ausreißer-Werten geprägt, welche in Abb. 15b zur besseren Übersicht ausgeblendet wurden. Die Streuung reichte hier, unter Einbeziehung der Ausreißer, von 0,02 mg/dl (MZP 1) bis 3,6 mg/dl (MZP 2). Von MZP 1 zu 2 bzw. von MZP 1 zu 3 fand ein Anstieg der CRP-Konzentration um jeweils $d = 0,42$ statt, während von MZP 2 zu 3 keine nennenswerte Veränderung zu beobachten war ($d = -0,11$).

Bei Betrachtung der LDH-Konzentrationen fällt auf, dass das 1. und 3. Quartil von MZP 1 zu 2 deutlich anstieg (Abb. 15c). Die LDH-Mittelwerte zeigten dagegen nur geringfügige Veränderungen über die Saison. Zum MZP 2 hin nahm die LDH-

Konzentration um $d = 0,65$ zu, änderte sich aber von MZP 2 zu 3 kaum ($d = -0,11$). Von MZP 1 zu 3 fand insgesamt ein Anstieg um $d = 0,55$ statt. Zu jedem MZP wurde ein negativer Ausreißer zwischen ca. 50 und 110 U/l gemessen. Die Streuung war zum MZP 1 unter Einbeziehung der Ausreißer am größten (ca. 50–300 U/l), nahm zum MZP 2 hin deutlich ab (ca. 100–270 U/l) und blieb dann zum MZP 3 etwa auf gleichem Niveau (ca. 90–270 U/l). Der Mittelwert zeigte einen ähnlichen Verlauf wie der Median. Zum MZP 1 lag er etwa 40 U/l unter dem Median, am 2. und 3. MZP waren beide etwa gleich auf. Der IGF-1-Mittelwert verlief über den gesamten Untersuchungszeitraum relativ konstant (Abb. 15d). Bei genauer Betrachtung sind schwache Veränderungen über den Saisonverlauf erkennbar. Von MZP 1 zu 2 stieg IGF-1 um $d = 0,29$ an, blieb dann aber bis MZP 3 nahezu unverändert ($d = 0,13$). Insgesamt war ein Anstieg von $d = 0,39$ zu verzeichnen (MZP 1 bis 3). Mittelwert und Median zeigten über die Saison einen ähnlichen Verlauf. Die Streuung war zum MZP 1 am größten (ca. 70–400 ng/ml) und nahm zum MZP 2 und 3 stark ab. Ein Ausreißer zum MZP 2 bei ca. 400 ng/ml ist in Abb. 15d erkennbar.

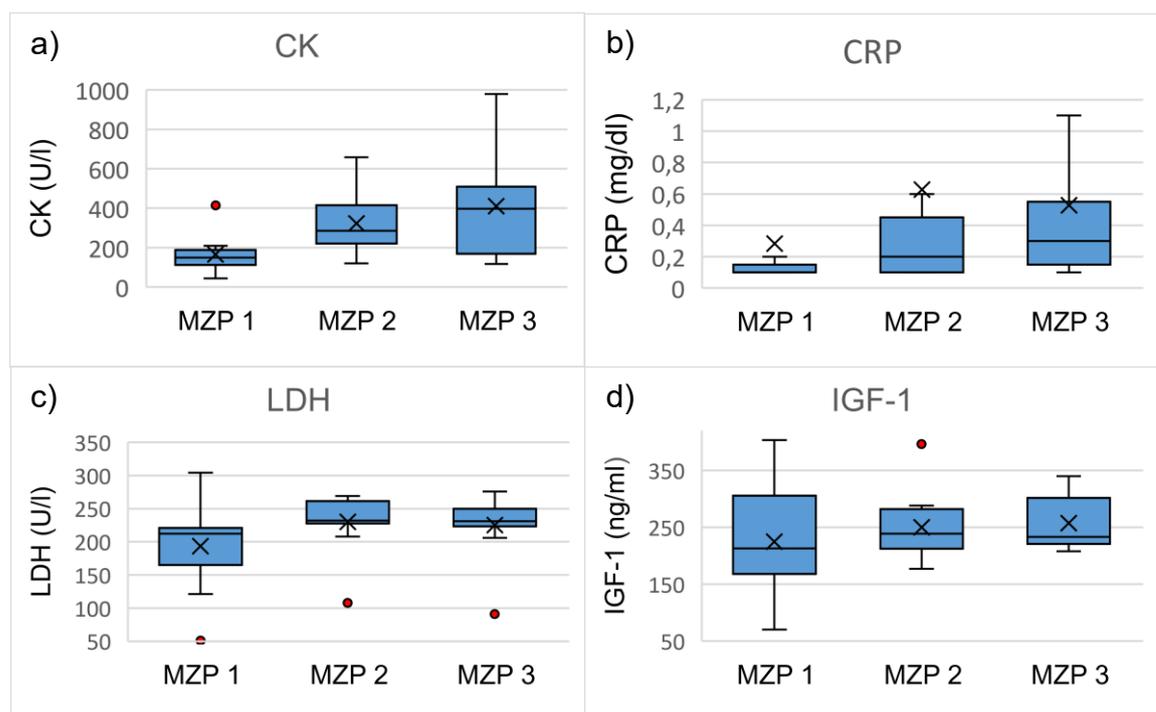


Abb. 15a–d: Laborwertmessungen von CK (a), CRP (b), LDH (c) und IGF-1 (d) zu den MZP 1 bis 3. Median und Mittelwert der CK (a) stiegen im Verlauf stetig an. Auch der CRP-Median (b) stieg kontinuierlich von MZP 1 bis 3 an, während der Mittelwert zum MZP 3 leicht abnahm. Der Mittelwert ist stark von Ausreißern beeinflusst, welche hier zur besseren Übersicht ausgeblendet wurden. Median und Mittelwert von LDH (c) und IGF-1 (d) zeigen eine leichte Zunahme von MZP 1 zu 2, blieben dann aber zum MZP 3 konstant. Der Median ist als Querlinie, der Mittelwert als „x“ innerhalb der Box gekennzeichnet. Minimum und Maximum werden durch die Whisker (Antennen) symbolisiert. Ober- und Unterkante der Boxen entsprechen dem 3. bzw. 1. Quartil. Ausreißer sind als rote Punkte markiert. Die Vertikalachsen von LDH und IGF-1 wurden zur besseren Übersicht gekürzt.

Da keine Normalverteilung gegeben ist, wurde zur statistischen Überprüfung der Mittelwertveränderungen der Friedman-Test verwendet. Der paarweise Vergleich erfolgte mithilfe des Post-hoc-Tests.

Die statistische Auswertung ergab einen relevanten Mittelwertanstieg der CK- ($p = 0,004$) und CRP-Konzentration ($p = 0,014$). Auch war ein positiver Effekt für LDH ($p = 0,060$) auszumachen. Beim IGF-1 ($p = 0,643$) waren dagegen im Friedman-Test keine relevanten Veränderungen der Mittelwerte über den Saisonverlauf festzustellen.

Der Post-hoc-Test ergab eine relevante Mittelwertsteigerung der CK-Konzentration von MZP 1 zu 2 ($p = 0,009$, $d = 0,38$) und von MZP 1 zu 3 ($p = 0,017$, $d = 0,36$). Beim CRP wies der Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur dagegen nur schwache Veränderungen auf (Tab. 15). Der Mittelwertunterschied der CK-Konzentration zeigte in beiden Fällen eine mittlere Effektgröße ($0,3 \leq d < 0,5$), während beim CRP jeweils nur eine niedrige Effektgröße ($0,1 \leq d < 0,3$) auszumachen war (Tab. 15).

Tab. 15: Effektgrößen und Signifikanzen der Post-hoc-Tests

	CK 1–2	CK 1–3	CK 2–3	CRP 1–2	CRP 1–3	CRP 2–3
Signifikanz (p)	0,009	0,017	1,0	0,165	0,076	1,0
Effektgröße (d)	0,38	0,36	0,03	0,25	0,29	0,04

Belastungsabhängige Veränderungen

Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Belastung und Beanspruchung wurden die Intervallspielzeiten sowie die 8-Tage-Spielzeiten mit den Laborparametern verglichen. Da zum MZP 1 bereits große interindividuelle Unterschiede in den Laborwerten vorhanden waren, wurden diese prozentual (Bezeichnung: CK%, CRP%, LDH%, IGF-1%) in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus (MZP 1) angegeben. Dadurch sind Aussagen über individuelle Veränderungen der Laborwerte trotz großer Unterschiede in den Absolutwerten möglich. Nach Ausschluss von Ausreißerwerten betragen die Stichprobengrößen $n = 10$ und $n = 11$ (keine Ausreißer).

Für den 2. MZP ergab die Korrelationsanalyse nach Pearson relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$) zwischen der 1. Intervallspielzeit (MZP 1–2) und den Laborparametern CRP% ($r = 0,645$; $n = 11$) und LDH% ($r = 0,589$; $n = 10$) sowie zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% ($r = 0,783$; $n = 10$).

Beim Vergleich der 1. Intervallspielzeit mit CRP% zum MZP 2 zeigten sich große Streuungen um die Trendlinie (Abb. 16). Vier von elf Werten lagen außerhalb des 95% Konfidenzintervalls um die Regressionsgerade. Sieben der elf Spieler hatten zum MZP 2 einen CRP-Wert von 100–200% des Ausgangsniveaus bei Intervallspielzeiten zwischen ca. 100 und 400 Minuten. Drei Spieler zeigten dagegen einen starken Anstieg des CRPs auf ca. 450–600% des Ausgangsniveaus. Alle drei Spieler wiesen Intervallspielzeiten oberhalb des Medians auf, zwei Spieler sogar die höchsten Intervallspielzeiten der Stichprobe (429 bzw. 504 min). Drei von vier Spielern mit den niedrigsten Intervallspielzeiten der Stichprobe (ca. 100 min.) zeigten dagegen keine Veränderung der CRP-Konzentration im Vergleich zum Ausgangsniveau.

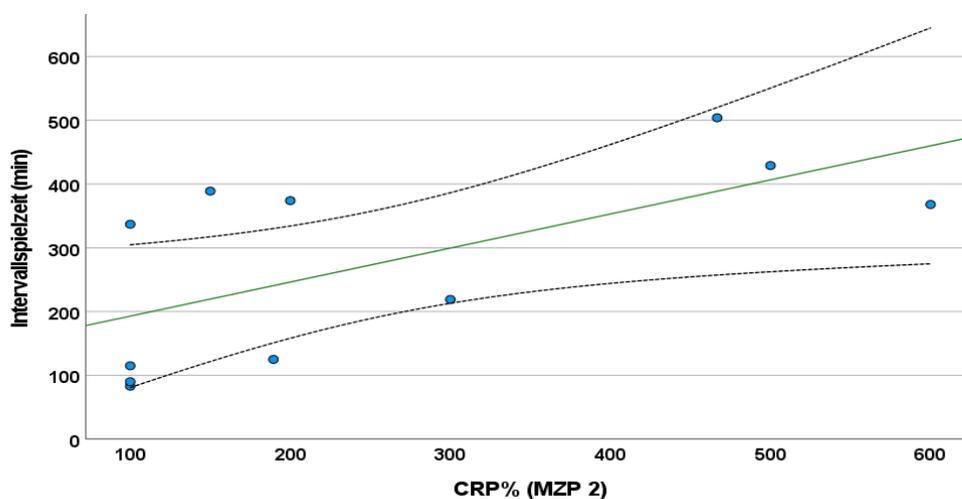


Abb. 16: Korrelation zwischen Intervallspielzeit und CRP% zum MZP 2 ($r = 0,645$). Die CRP-Konzentration stieg auf bis zu 600% des Ausgangsniveaus. Die Streuung um die Regressionsgerade ist hoch, mit vier Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Die Regressionsgerade (grün) gibt den linearen Zusammenhang zwischen Intervallspielzeit und CRP% an. Das 95% Konfidenzintervall ist als gestrichelte Linien neben der Regressionsgeraden dargestellt. Die Stichprobengröße lag hier bei $n = 11$.

Ebenso zwischen der 1. Intervallspielzeit und LDH% zum MZP 2 zeigte sich eine große Streuung um die Trendlinie mit vier von zehn Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls (Abb. 17). Die Werte lagen hier zwischen ca. 80 und 140% des Ausgangsniveaus. Ab ca. 300 Minuten Spielzeit war ein Anstieg von LDH auf ca. 120–140% zu verzeichnen. Nur ein Spieler zeigte bei über 300 Minuten Spielzeit einen LDH-Abfall auf ca. 90%. Unterhalb 250 Spielminuten lagen die LDH-Werte zwischen ca. 105 und 115%. Ein Spieler mit ca. 100 Spielminuten wies dagegen nur einen LDH-Wert von 75% des Ausgangsniveaus auf.

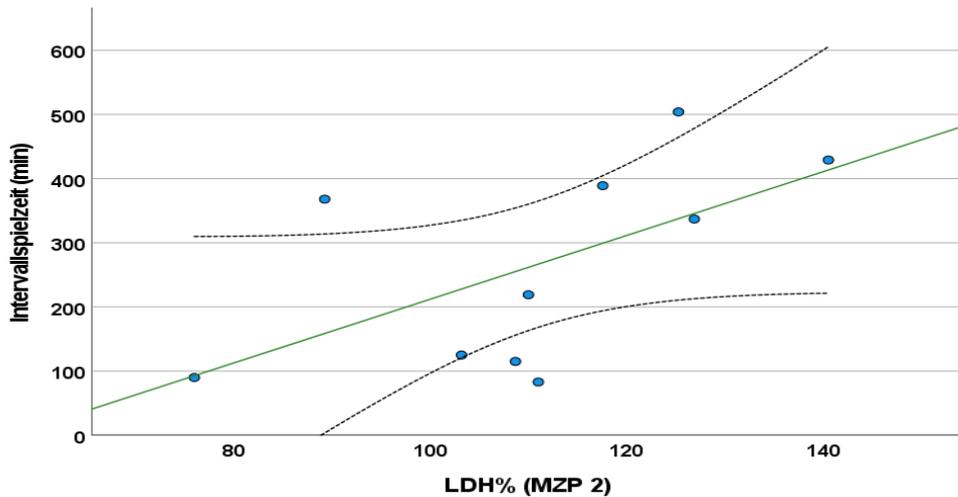


Abb. 17: Korrelation zwischen Intervallspielzeit und LDH% zum MZP 2 ($r = 0,589$). Die LDH-Werte lagen bei ca. 80–140% des Ausgangsniveaus und zeigten damit eine weniger starke Veränderung als das CRP (Abb. 16). Auch hier ist eine große Streuung mit vier von zehn Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls zu erkennen. Die Regressionsgerade (grün) gibt den linearen Zusammenhang zwischen Intervallspielzeit und LDH% an. Das 95% Konfidenzintervall ist als gestrichelte Linien neben der Regressionsgeraden dargestellt. Die Stichprobengröße lag hier bei $n = 10$.

Zwischen LDH% und der 8-Tage-Spielzeit zum MZP 2 bestand die größte Korrelation ($r = 0,783$), was anhand der Steigung der Regressionsgeraden in Abb. 18 verdeutlicht wird. Die Streuung war hier insgesamt geringer und es befanden sich zwei Werte außerhalb des 95% Konfidenzintervalls der Regressionsgeraden. Von den drei Spielern ohne Spieleinsatz in den letzten acht Tagen hatten zwei einen niedrigeren LDH-Wert als zum MZP 1 (ca. 75 bzw. 90%), wohingegen ein Spieler einen Anstieg auf ca. 110% zeigte. Bei einem Spieleinsatz von 70–100 Minuten ergaben sich bei drei von vier Spielern ein LDH-Wert von ca. 100–110%, während ein Spieler einen Anstieg auf ca. 130% vorwies. Die drei Spieler mit den höchsten Spielzeiten (ca. 150 min) zeigten dagegen LDH-Werte von ca. 120–140% des Ausgangsniveaus.

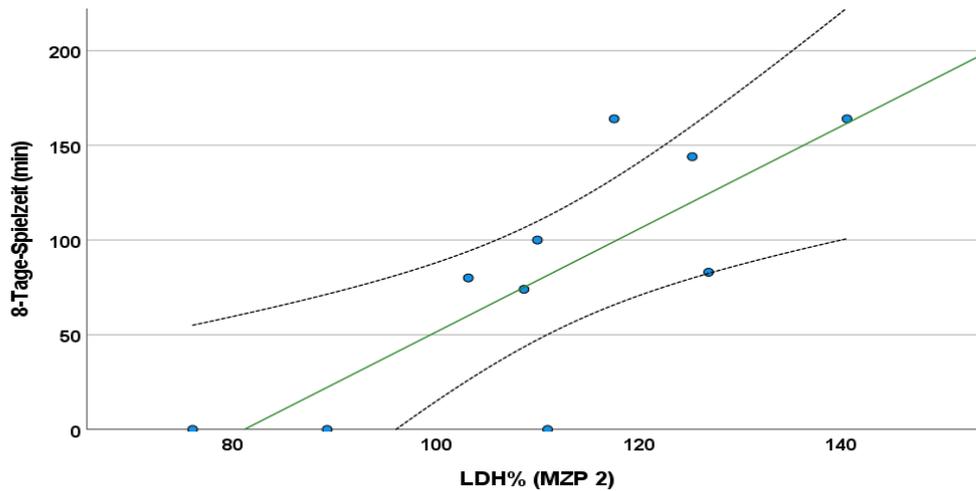


Abb. 18: Korrelation zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% zum MYP 2 ($r = 0,783$). Die Streuung ist hier wesentlich geringer, die Regressionsgerade wesentlich steiler als in den Abb. 16 und 17. Die LDH-Werte lagen zwischen ca. 80 und 140% des Ausgangsniveaus. Die Regressionsgerade (grün) gibt den linearen Zusammenhang zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% an. Das 95% Konfidenzintervall ist als gestrichelte Linien neben der Regressionsgeraden dargestellt. Die Stichprobengröße lag hier bei $n = 10$.

Zum MYP 3 konnten für CRP% und LDH% lediglich mittlere positive Korrelationen mit der Intervallspielzeit festgestellt werden ($r_{\text{CRP}} = 0,381$ bzw. $r_{\text{LDH}} = 0,336$), weshalb auf eine graphische Darstellung verzichtet wurde. Aufgrund der geringen Stichprobengröße ist trotz mittlerer Korrelation kein eindeutiger Zusammenhang festzustellen ($p_{\text{CRP}} = 0,277$ bzw. $p_{\text{LDH}} = 0,343$). Zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% zum MYP 3 war dagegen gar kein Effekt erkennbar ($r_{\text{LDH}} = 0,016$).

4.3 Posturographie (IBS)

Zur Überprüfung der posturalen Stabilität wurden seitens des IBS der Gewichtsverteilungsindex (WDI) und der Stabilitätsindikator (ST) verwendet. Die Messung erfolgte in vier unterschiedlichen Positionen (Kapitel 3.3.3), wobei für die Auswertung der Posturographie gezielt die Positionsvariante „PC“ (mit Schaumstoffkissen, Augen geschlossen) betrachtet wurde, da diese die größten posturalen Anforderungen impliziert (Schwesig et al., 2014).

Veränderungen über den Saisonverlauf

Der Mittelwert des WDI (PC) zeigte einen konstanten Verlauf über die Saison (Abb. 19a). Eine relevante Veränderung der Mittelwerte konnte weder von MZP 1 zu 2 ($d = 0,03$), noch von MZP 2 zu 3 ($d = -0,06$) oder von MZP 1 zu 3 ($d = -0,03$) festgestellt werden. Die Maximalwerte lagen ca. zwischen 12 und 15 (inkl. Ausreißer), die Minima blieben konstant bei ca. 3 über den gesamten Untersuchungszeitraum. Die Streubreite bewegte sich zwischen ca. 9 (MZP 1) und 12 (MZP 2). Der Mittelwert zeigte einen ähnlichen Verlauf wie der Median und lag konstant bei ca. 6. Zwei Ausreißer bei ca. 9 und 15 waren zum MZP 2 zu verzeichnen.

Bei Betrachtung des ST-Mittelwerts zeigte sich zwischen MZP 1 und 2 eine leichte Abnahme von $d = -0,41$ (Abb. 19b). Auch Streubreite, Maximalwert sowie oberes und unteres Quartil nahmen von MZP 1 zu 2 deutlich ab. Von MZP 2 zu 3 änderte sich der Mittelwert dagegen kaum ($d = 0,05$), Minimum und Maximum (inkl. Ausreißer) stiegen jedoch leicht an. Zwischen MZP 1 und 3 war insgesamt eine Abnahme von $d = -0,37$ zu verzeichnen. Beim Vergleich der Mediane ergab sich dagegen ein entgegengesetzter Trend: Zunächst war ein leichter Anstieg zum MZP 2 zu beobachten und anschließend eine leichte Abnahme zum MZP 3. Ein Ausreißer bei ca. 38 wurde zum MZP 3 erfasst.

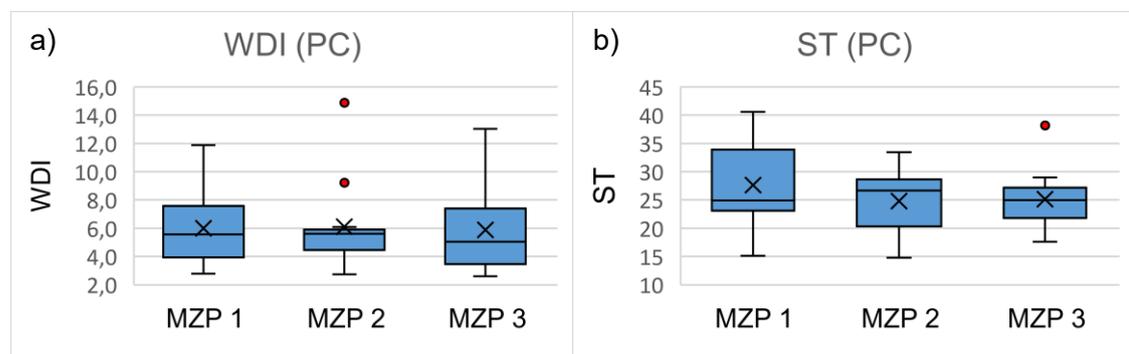


Abb. 19a–b: Verlauf der posturographischen Parameter WDI (a) und ST (b). Median und Mittelwert des WDI blieben über die MZP 1–3 konstant bei ca. 5–6 (a). Der ST-Mittelwert (b) sank zum MZP 2 hin leicht ab und blieb zum MZP 3 konstant. Der Median ist als Querlinie, der Mittelwert als „x“ innerhalb der Boxen dargestellt. Minimum und Maximum werden durch die Whisker (Antennen) symbolisiert. Ober- und Unterkante der Boxen entsprechen dem 3. bzw. 1. Quartil. Ausreißer sind als rote Punkte markiert. Sowohl WDI als auch ST sind dimensionslos. Die Vertikalachsen wurden zum besseren Überblick gekürzt. Die Stichprobengröße betrug in beiden Fällen $n = 11$.

Im Friedman-Test konnten keine Mittelwertveränderung für den WDI festgestellt werden ($p = 0,933$). Auch beim ST zeigte sich keine relevante Änderung der Mittelwerte ($p = 0,107$) in der Varianzanalyse mit Messwiederholung.

Belastungsabhängige Veränderungen

Zur Identifizierung von Zusammenhängen zwischen Belastung und posturaler Stabilität wurden die posturographischen Daten mit den Spielzeiten verglichen. Die WDI- und ST-Werte wurden dazu, wie schon die Laborwerte, prozentual vom Ausgangsniveau (MZP 1) betrachtet (Bezeichnung: WDI%, ST%). Es waren keine Ausreißerwerte vorhanden. Somit blieb die Stichprobengröße bei $n = 11$.

Die Korrelationsanalyse nach Pearson ergab zu keinem Zeitpunkt eine relevante Korrelation ($r > |0,5|$) mit der Intervallspielzeit bzw. 8-Tage-Spielzeit. Lediglich der ST zeigte nennenswerte Korrelationen mit der Intervallspielzeit ($r = -0,456$) und der 8-Tage-Spielzeit ($r = -0,331$) zum MZP 2. Auf eine graphische Darstellung wurde aufgrund der geringen Relevanz jedoch verzichtet.

4.4 Drop Jumps

Die Auswirkung der Spielbelastung auf die Reaktivkraft der Spieler wurde mithilfe der Drop Jumps (Kapitel 3.3.4) untersucht. Dazu wurde die maximale Sprunghöhe mit der Spielbelastung verglichen und mögliche Zusammenhänge analysiert. Die Stichprobengröße blieb bei $n = 11$, da keine Ausreißer beobachtet wurden.

Veränderungen über den Saisonverlauf

Die durchschnittliche Sprunghöhe der beidbeinigen Drop Jumps („DJ bb“) lag zu den MZP 1 und 2 bei 35,1 cm (Abb. 20a). Zum MZP 3 fand eine minimale Abnahme um 0,3 cm statt ($d = -0,05$). Der Median zeigte hier einen ähnlichen Verlauf. Eine deutliche Veränderung der durchschnittlichen Sprunghöhe über den Saisonverlauf lässt sich aus Abb. 20a nicht ableiten. Die Streuung sank von MZP 1 zu 2 von ca. 20 cm auf ca. 16 cm und stieg zum MZP 3 wieder auf ca. 20 cm an.

Bei den rechtsbeinigen Drop Jumps („DJ re“) fand eine leichte Zunahme der Sprunghöhe zum MZP 2 statt ($d = 0,39$; Abb. 20b). Vor allem Minimum und Maximum, aber auch 1. und 3. Quartil lassen einen Anstieg zum MZP 2 erkennen. Zum MZP 3 nahm die Sprunghöhe wieder minimal ab ($d = -0,12$), lag aber dennoch über dem Ausgangsniveau ($d = 0,28$). Der Median verblieb über alle drei MZP konstant zwischen 20,2 und 20,7 cm. Die linksbeinigen Drop Jumps („DJ li“) wiesen im Durchschnitt eine schwach steigende Tendenz über den Saisonverlauf auf (Abb. 20c). Zum MZP 2 war eine minimale Zunahme ($d = 0,11$) zu verzeichnen. Anders als bei den DJ bb und DJ re stieg sie zum MZP 3 weiter an ($d = 0,17$). Von MZP 1 zu 3 war ein kleiner Effekt im Mittelwertanstieg zu beobachten ($d = 0,31$). Die Streuungsbreite blieb über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant bei ca. 18 cm.

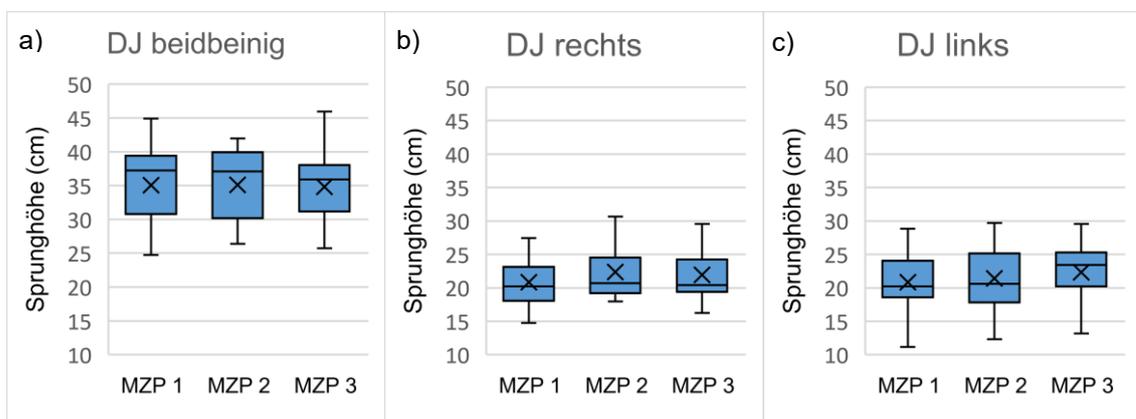


Abb. 20a–c: Sprunghöhen der Drop Jumps beidbeinig (a), rechtsbeinig (b) und linksbeinig (c) über den Saisonverlauf. Die DJ bb (a) zeigten im Mittel nahezu keine Veränderung. Lediglich die Spannweite der Messwerte verringerte sich zum MZP 2. Der Mittelwert der DJ rechts (b) nahm zum MZP 2 am deutlichsten zu, fiel aber zum MZP 3 wieder leicht ab. Der Mittelwert der DJ li (c) zeigte nahezu keine Veränderung über alle drei MZP hinweg. Der Median ist als Querlinie, der Mittelwert als „x“ innerhalb der Boxen dargestellt. Die Whisker (Antennen) zeigen Minimum und Maximum der Stichprobe. Die Stichprobengröße lag jeweils bei $n = 11$.

Insgesamt stieg die mittlere Sprunghöhe der DJ re und DJ li über den Saisonverlauf leicht an, während sie für die DJ bb konstant blieb.

Der Mittelwertvergleich erfolgte mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung, da die Stichproben normalverteilt sind. Bei keiner der drei Sprungvarianten konnte ein relevanter Unterschied der Mittelwerte festgestellt werden ($p_{DJ\ bb} = 0,922$; $p_{DJ\ re} = 0,276$; $p_{DJ\ li} = 0,223$).

Belastungsabhängige Veränderungen

Durch Vergleich der Spielzeiten mit den Sprunghöhen der Spieler wurden mögliche Veränderungen der Reaktivkraft im Zusammenhang mit einer hohen Spielbelastung untersucht. Analog zu den Labor- und Posturographie-Daten wurden die Sprunghöhen dazu prozentual in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus (MZP 1) angegeben. Während zum 2. MZP nur mittlere und schwache Korrelationen ($r < |0,5|$) beobachtet wurden, zeigten sich zum 3. MZP in drei Fällen relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$).

Die DJ bb% korrelierten positiv mit der Intervallspielzeit ($r = 0,544$; Abb. 21) und der 8-Tage-Spielzeit ($r = 0,706$; Abb. 22) zum MZP 3. Die Sprunghöhen lagen hier im Bereich von ca. 90–110%, acht von elf Werte sogar zwischen ca. 97 und 105% des Ausgangsniveaus. Wie bereits in Abb. 20a zu erkennen ist, gab es hier kaum Veränderungen über den Saisonverlauf.

Beim Vergleich der Intervallspielzeiten mit den DJ bb% zum MZP 3 (Abb. 21) ist eine starke Streuung um die Durchschnittsgerade zu erkennen. Vier Werte liegen außerhalb des 95% Konfidenzintervalls der Regressionsgeraden. Unterhalb 400 Spielminuten lagen die Sprunghöhen zwischen ca. 90 und 100% des Ausgangsniveaus. Bei Spielzeiten von 400–600 Minuten war die Spannbreite am größten und reichte von ca. 90–110%. Oberhalb von 700 Spielminuten lagen die Sprunghöhen dagegen nur bei ca. 97–105% des Ausgangswerts.

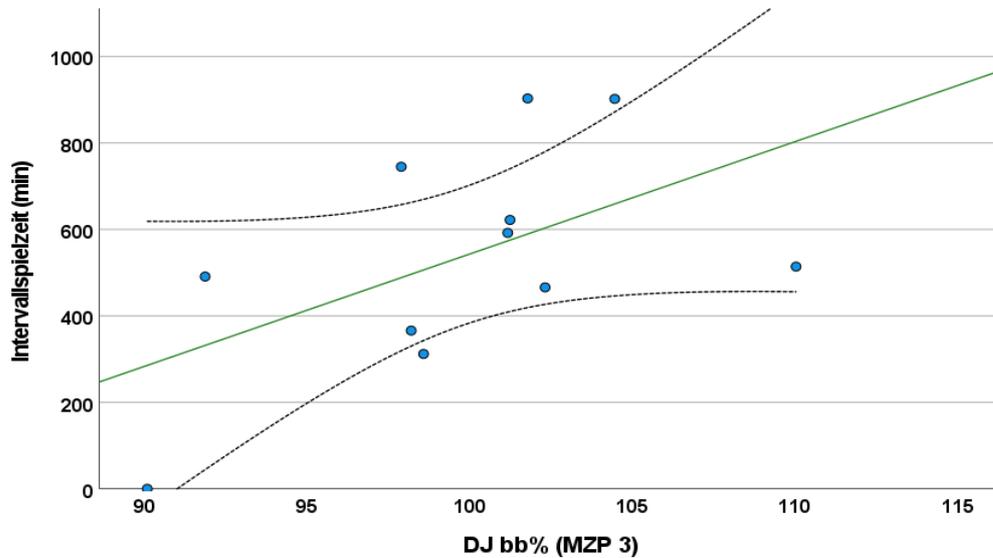


Abb. 21: Korrelation zwischen Intervallspielzeit und DJ bb% zum MZP 3 ($r = 0,544$). Es zeigt sich eine große Streuung um die Regressionsgerade (grün) mit vier Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls (gestrichelte Linien). Die Sprunghöhen lagen bei ca. 90-110% des Ausgangsniveaus, acht von elf Werte sogar zwischen ca. 97 und 105% und unterschieden sich somit kaum vom Ausgangsniveau (MZP 1). Die Stichprobengröße lag bei $n = 11$.

Eine deutlich geringere Streuung um die Regressionsgerade zeigte sich beim Vergleich der 8-Tage-Spielzeit mit den DJ bb% zum MZP 3 (Abb. 22). Hier liegen nur zwei von elf Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Während die meisten Spieler bei mittlerer Spielzeit (70–120 min) kaum eine Veränderung der Sprunghöhe aufwiesen, zeigten zwei von drei Spielern mit niedriger Spielzeit (< 50 min) eine Abnahme der Sprunghöhe auf ca. 90–92% des Ausgangsniveaus. Der dritte Spieler lag hier im Bereich von ca. 103%. Bei Spielzeiten von über 100 Minuten reichten die Sprunghöhen bei drei von vier Spielern von ca. 102–110% des Ausgangsniveaus, wohingegen ein Spieler eine leichte Abnahme auf ca. 97% aufwies.

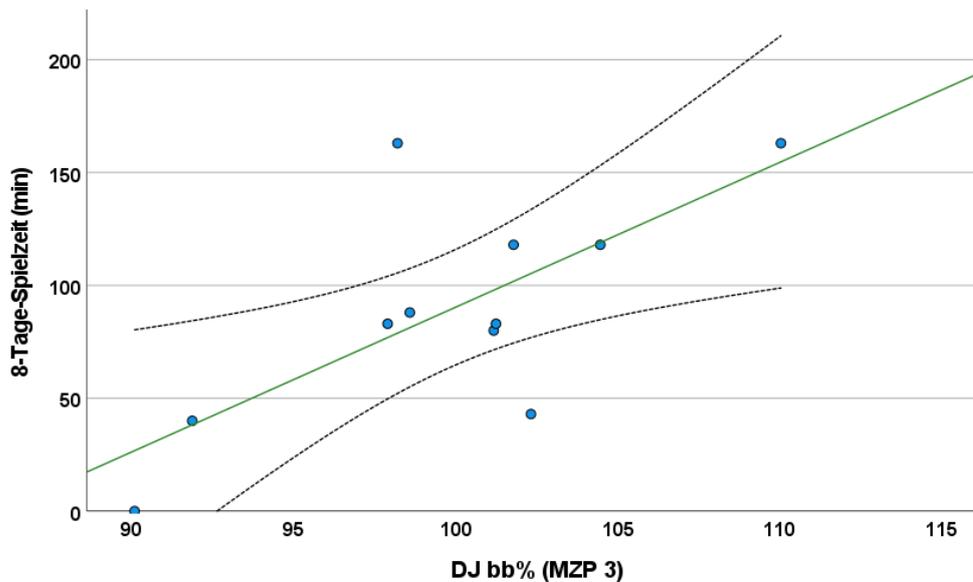


Abb. 22: Korrelation zwischen 8-Tage-Spielzeit und DJ bb% zum MZP 3 ($r = 0,706$). Die Streuung um die Regressionsgerade ist hier vergleichsweise gering. Nur zwei von elf Werten liegen außerhalb des 95% Konfidenzintervalls (gestrichelte Linie). Die übrigen neun Werte liegen nahe an der Regressionsgeraden (grüne Linie). Die geringfügigen Veränderungen der Sprunghöhen wurden bereits in Abb. 21 beschrieben. Die Stichprobengröße lag bei $n = 11$.

Bei den DJ li zeigten sich zum MZP 3 teils stärkere Veränderungen der Sprunghöhe als bei den DJ bb (Abb. 23). Die Werte lagen hier im Bereich von ca. 95–130% des Ausgangsniveaus, wobei auch hier sieben von elf Werten im Bereich von ca. 90–110% lagen. Die Streuung der Werte um die Trendlinie ist groß, mit vier Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls. Vier der fünf Spieler mit hohen Intervallspielzeiten von ca. 600 Minuten und höher zeigten aber einen deutlichen Anstieg der Sprunghöhe um ca. 15–30%. Unterhalb von 400 Spielminuten lagen die Sprunghöhen dagegen bei zwei von drei Spielern bei ca. 95 und 100% des Ausgangsniveaus, beim dritten Spieler jedoch bei 110%.

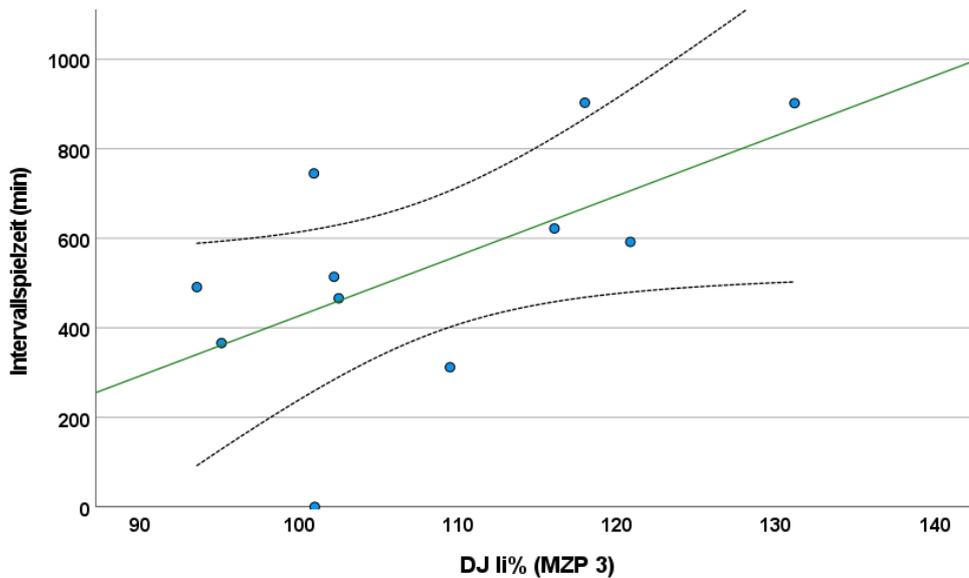


Abb. 23: Korrelation zwischen Intervallspielzeit und DJ li% zum MZP 3 ($r = 0,602$). Es zeigt sich eine große Streuung um die Regressionsgerade (grün) mit vier Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls (gestrichelte Linien). Die Spannbreite der Sprunghöhen war hier größer als bei den DJ bb% (Abb. 21, 22) und lag zwischen ca. 95 und 130%. Sieben von elf Werten lagen aber auch hier im Bereich von 90–110% des Ausgangsniveaus. Die Stichprobengröße lag bei $n = 11$.

Zwischen den DJ li und der 8-Tage-Spielzeit zum MZP 3 ergab sich nur eine schwach positive Korrelation ($r = 0,175$).

Die DJ re zeigten zum MZP 3 eine positive Korrelation von $r = 0,495$ mit der 8-Tage-Spielzeit, was nur knapp unterhalb der gewählten Relevanzgrenze liegt. Mit der Intervallspielzeit korrelierten die DJ re dagegen nur schwach ($r = 0,270$).

Zum MZP 2 lagen alle Korrelationen bei $r < |0,3|$ und wurden daher in den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

4.5 Korrelationen zwischen leistungsphysiologischen Parametern

Im Folgenden wurde der Zusammenhang zwischen den verschiedenen leistungsphysiologischen Parametern überprüft. Dazu wurden Laborwerte, Posturographie-Daten und Sprunghöhen der Drop Jumps zu jedem MZP miteinander verglichen. Ausreißer-Werte wurden zuvor aus der Analyse ausgeschlossen. Die Stichprobengrößen variierten zwischen $n = 11$ und $n = 8$.

Labor vs. WDI (PC)

Beim Vergleich der CK-Konzentrationen mit dem WDI (PC) konnten relevante negative Korrelationen zu den MZP 1 ($r = -0,688$) und 3 ($r = -0,673$) ausgemacht werden. Zum MZP 2 lag nur eine schwach negative Korrelation vor ($r = -0,270$). Demnach ging ein Anstieg der CK-Konzentration zu den MZP 1 und 3 mit einer Abnahme des WDI (PC) (also mit einer ausgeglichenen Gewichtsverteilung) einher. Die Stichprobengröße lag hier bei $n = 10$.

Auch die LDH-Konzentrationen zeigten negative Korrelationen mit dem WDI (PC) zu allen drei MZP. Dabei war jedoch nur eine relevante Korrelation zum MZP 1 zu verzeichnen ($r = -0,675$; $n = 10$). Zu den MZP 2 ($r = -0,343$; $n = 9$) und 3 ($r = -0,458$; $n = 9$) lagen dagegen nur mittlere Korrelationen vor.

Zwischen den IGF-1-Konzentrationen und dem WDI (PC) ergaben sich sowohl relevante positive (MZP 2: $r = 0,668$) als auch negative Korrelationen (MZP 1: $r = -0,669$) nach Ausschluss eines Ausreißers ($n = 10$).

Das CRP zeigte dagegen zu keinem der drei MZP relevante Korrelationen mit dem WDI.

Labor vs. ST (PC)

Zwischen den Laborwerten und ST (PC) konnte nur eine relevante Korrelation zwischen LDH und ST (PC) zum MZP 3 gefunden werden ($r = 0,636$). Zu den MZP 1 ($r = 0,251$) und 2 ($r = -0,260$) waren dagegen nur schwache Korrelationen festzustellen. Die Stichprobengröße lag hier zum MZP 1 bei $n = 11$, zu den MZP 2 und 3 bei $n = 10$.

Für die Laborparameter CK, CRP und IGF-1 ergaben sich zu keinem der drei MZP relevanten Zusammenhänge mit dem ST.

DJ vs. ST (PC)

Zwischen den Sprunghöhen der Drop Jumps und ST (PC) ergaben sich relevante positive Korrelationen zu jedem der drei MZP (Tab. 16). Dabei wiesen die DJ bb zum MZP 2 die höchste Korrelation auf ($r = 0,744$), während zu den MZP 1 und 3 die Korrelationen nur knapp unter $r = 0,5$ lagen ($r_{\text{MZP1}} = 0,491$ bzw. $r_{\text{MZP3}} = 0,496$). Für die DJ re ergaben sich zu den MZP 1 ($r = 0,580$) und 2 ($r = 0,564$) relevante positive Korrelationen, zum MZP 3 dagegen nur eine mittlere positive Korrelation ($r = 0,411$). Die DJ links zeigten als einziger Parameter an allen drei MZP relevante positive Korrelationen ($r_{\text{MZP1}} = 0,579$; $r_{\text{MZP2}} = 0,551$; $r_{\text{MZP3}} = 0,546$). Die Stichprobengröße blieb zu allen drei MZP bei jeweils $n = 11$.

Tab. 16: Korrelationen zwischen DJ und ST (PC). Angegeben sind die Pearson-Korrelationskoeffizienten (r). Alle drei Sprungvarianten zeigten relevante positive Korrelationen mit ST ($r > 0,5$). Die größte Korrelation bestand zwischen den DJ bb zum MZP 2 ($r = 0,744$; $n = 11$). Die Stichprobengröße lag zu allen drei MZP bei jeweils $n = 11$.

Parameter	DJ bb			DJ re			DJ li		
	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 1	MZP 2	MZP 3
ST (PC)	0,491	0,744	0,496	0,580	0,564	0,411	0,579	0,551	0,546

DJ vs. WDI (PC)

Zwischen den DJ und dem WDI (PC) zeigten sich keine relevanten Korrelationen über den gesamten Untersuchungszeitraum.

5 Diskussion

Bei der Auswertung der leistungsphysiologischen Parameter der U17-Fußballmannschaft des HFC konnte ein deutlicher Anstieg der CK-Konzentration ($d_{\text{MZP1-2}} = 1,19$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = 1,23$) sowie schwache bzw. mittlere Anstiege von CRP ($d_{\text{MZP1-2}} = d_{\text{MZP1-3}} = 0,42$), LDH ($d_{\text{MZP1-2}} = 0,65$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = 0,55$) und IGF-1 ($d_{\text{MZP1-2}} = 0,29$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = 0,39$) über die Saison 2017/18 festgestellt werden. Der ST (PC) zeigte eine geringe Abnahme von MZP 1 – 2 ($d = -0,41$) bzw. MZP 1 – 3 ($d = -0,37$). Bei den DJ rechts ($d_{\text{MZP1-2}} = 0,39$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = 0,28$) und links ($d_{\text{MZP1-3}} = 0,31$) fanden geringe Anstiege im Verlauf statt. Der WDI (PC) sowie die DJ beidbeinig blieben konstant. Mit Ausnahme der CK ($d_{\text{MZP2-3}} = 0,40$) zeigten sich zwischen MZP 2 und 3 keine relevanten Veränderungen der Parameter. Aufgrund hoher interindividueller Unterschiede bei zudem geringer Stichprobenzahl ($n = 11$) bedarf dies jedoch einer genaueren, individuellen Betrachtung. Die Veränderungen der Laborparameter CRP (CRP%) und LDH (LDH%) zeigten zum MZP 2 relevante positive Korrelationen mit der Intervallspielzeit (CRP%, LDH%) bzw. der 8-Tage-Spielzeit (LDH%), wohingegen zum MZP 3 keine relevanten Korrelationen zu verzeichnen waren.

Die Sprunghöhen der Drop Jumps korrelierten positiv mit der Intervall- (DJ bb%, DJ li%), bzw. 8-Tage-Spielzeit (DJ bb%) zum MZP 3, während hier zum MZP 2 keine relevanten Korrelationen gefunden wurden.

Zwischen den einzelnen Parametern zeigte sich nur beim Vergleich von CK und WDI (PC) sowie DJ und ST (PC) relevante Korrelationen. Ein Anstieg der CK korrelierte zu den MZP 1 und 3 positiv mit der posturalen Stabilität, die Sprunghöhe bei den Drop Jumps dagegen negativ mit der posturalen Stabilität. Eine genaue Interpretation der einzelnen Ergebnisse ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.1 Ergebnisdiskussion

Laborparameter

Ein Anstieg der CK-Konzentration fand zwar über den Saisonverlauf statt, relevante Korrelationen mit der Spielzeit konnten jedoch nicht festgestellt werden. Besonders zwischen MZP 1 und 2 ($d = 1,19$) und zwischen MZP 1 und 3 ist ein deutlicher Mittelwertanstieg zu erkennen ($d = 1,23$). Dagegen zeigte sich zwischen den MZP 2 und 3 nur ein geringer CK-Anstieg ($d = 0,40$), was darauf hindeutet, dass die muskuläre Beanspruchung im weiteren Verlauf der Saison kaum zugenommen hat. Während manche Spieler einen starken Anstieg (bis zu zehnfache Steigerung von MZP 1 zu 3) zu verzeichnen hatten, zeigten andere trotz hoher Spielzeit nur einen mäßigen Anstieg. Bei einem der Spieler nahm die CK-Konzentration sogar über den Saisonverlauf hin um bis zu 33% ab. Zwei Spieler zeigten bei nahezu gleicher Spielminutenanzahl vor MZP 3 einen Unterschied in der CK-Konzentration von 822 U/l (Abb. 24; Tab. 17). Daran ist deutlich zu erkennen, dass die Belastung in Form von Spielminuten sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Spieler hatte, bzw. dass die Anzahl der Spielminuten als alleiniger Belastungsparameter unzureichend ist.

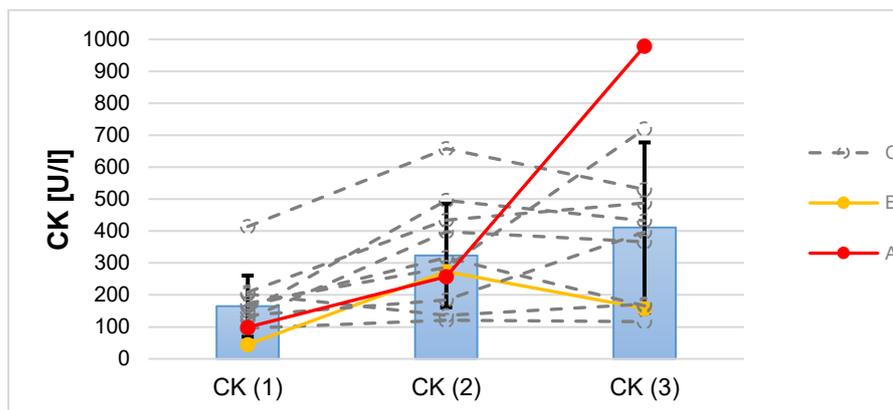


Abb. 24: CK-Werte der einzelnen Spieler über den Saisonverlauf. Farblich hervorgehoben sind zwei Spieler (A und B), deren CK-Werte zum MZP 3 stark unterschiedlich verlaufen trotz ähnlicher Anzahl an Spielminuten (Tab. 17). Die CK-Werte der restlichen neun Spieler sind als graue, gestrichelte Linien dargestellt (C).

Tab. 17: Exemplarischer Vergleich der CK-Werte [U/l] und Spielzeiten [min] zweier Spieler (A und B) zum MZP 3.

	Intervallspielzeit (MZP 2–3)	8-Tage-Spielzeit (MZP 3)	CK (MZP 3)
Spieler A	622	83	979
Spieler B	592	80	157

Dass die CK über den Saisonverlauf von Fußballspielern ansteigt, konnte bereits in verschiedenen Studien gezeigt werden (Meyer und Meister, 2011; Silva et al., 2013; Nowakowska et al., 2019). Bei einer Studie mit 20 polnischen Profi-Fußballspielern konnte lediglich eine sehr schwache positive Korrelation ($r = 0,17$) zwischen der CK-

Konzentration und der kumulativen Spielzeit von Mittelfeld- und Abwehrspielern über eine Gesamtsaison festgestellt werden (Nowakowska et al., 2019). Da die CK-Aktivität jedoch einer hohen inter- und intraindividuelle Variation unterliegt, sollten Laborwerte möglichst häufig kontrolliert werden (Becker et al., 2020). Hier unterscheidet man zwischen *High-Responder* und *Low-Responder*, d. h. ein Anstieg nach körperlicher Belastung kann sowohl hoch, als auch gering ausfallen (Brancaccio et al., 2010). Zudem spielen weitere Faktoren wie die Spielerposition eine entscheidende Rolle. So konnte gezeigt werden, dass Mittelfeldspieler signifikant höhere CK-Level erreichen als Abwehrspieler (Souglis et al., 2018). In diesem Zusammenhang wäre zu ergründen, welche Positionsspezifik diese Unterschiede verursacht. Ist es die per se größere Laufstrecke des Mittelfeldspielers oder ist es die größere Anzahl an Sprints bzw. Richtungswechseln/ Beschleunigungen, die hierfür ursächlich verantwortlich sind. Aktuell findet beim HFC (Drittliga-Team) eine diesbezügliche längsschnittliche Datenerhebung (CK, Borg-Skala, Laufdaten) sowie ein Screening der Spiele mittels Trackingsystem (Polar Team Pro System) statt, so dass am Ende der Saison 2021/2022 sich diese Frage beantworten lassen sollte. Andere Faktoren wie kurzfristige hohe Belastungen, Muskelverletzungen, Muskelmasse, Muskelfasertyp und selten Myopathien können ebenfalls zu einem hohen Serum-Spiegel führen, der nicht die kumulative Belastung der letzten Wochen widerspiegelt (Brancaccio et al., 2007). Der zeitliche Abstand zwischen dem Testtag und dem letzten Spiel ist zudem ein weiterer Einflussfaktor auf die CK-Konzentration. Da nicht alle Spieler am selben Tag getestet werden konnten, musste dies an zwei aufeinanderfolgenden Tagen geschehen, wodurch sich die Erholungsphasen der verschiedenen Testgruppen um ca. 24 h unterschieden. Zudem könnte gerade das letzte bzw. die letzten beiden Spiele vor einem MZP ausschlaggebend für die CK-Konzentration gewesen sein. Wie in Abb. 14 (Kapitel 4.1) zu erkennen ist, lagen die letzten beiden Spiele vor MZP 2 deutlich näher zusammen als vor MZP 3. Da die CK einen akuten Parameter darstellt, könnte der starke CK-Anstieg vor MZP 2 durch die hohe Spieldichte unmittelbar vor der Messung bedingt sein und nicht die kumulative Ermüdung bzw. Beanspruchung widerspiegeln. Dasselbe Problem besteht mit den übrigen leistungsphysiologischen Parametern, die in dieser Studie erhoben worden sind.

Aus der Literatur ist bereits bekannt, dass die CK-Konzentrationen von Profifußballspielern durchschnittlich stark erhöhte Werte aufweisen. In einer Studie mit 122 brasilianischen Fußballspielern wurden Werte bis 975 U/l (90. Perzentile) bzw. 1338 U/l (97,5. Perzentile) gemessen (Lazarim et al., 2009). Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte Mougios (2007), welcher einen Referenzwert von 83–1492 U/l (2,5.–97,5. Perzentile) bei einer Gruppe von 182 Fußballspielern angibt. Dabei lagen die CK-Werte der Fußballer

weit höher als die der Schwimmer, welche sich im Bereich von 70–523 U/l (2,5.–97,5. Perzentile) bewegten. Auch Meyer und Meister (2011) fanden ein ähnliches CK-Niveau von bis zu 1327 U/l (97,5. Perzentile) bei deutschen Spielern der 1. und 2. Bundesliga während der Saison. Allerdings stellten Meister et al. (2013) fest, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den CK-Konzentrationen von Profifußballern nach hohen Belastungswochen (> 270 min Spielzeit innerhalb der letzten 3 Wochen) und niedrigen Belastungswochen (< 270 min Spielzeit innerhalb der letzten 3 Wochen) gab. Dies bekräftigt das Ergebnis dieser Studie, wonach keine relevanten Korrelationen zwischen kumulativer Spielzeit und CK-Werten zu beobachten waren. Hader et al. (2019) konnte allerdings in einer Metaanalyse die gelaufene Strecke mit einer Geschwindigkeit von > 5,5 m/s (= 19,8 km/h) während eines Spiels als zuverlässigen Belastungsindikator identifizieren. Demnach stieg die CK-Konzentration 24 Stunden nach einem Spiel um durchschnittlich 30% pro 100 m Sprint > 5,5 m/s an. Andere Faktoren wie die gelaufene Gesamtstrecke zeigten dagegen nur einen schwach prädiktiven Wert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass auch die Spielzeit einzeln betrachtet nur eine geringe Sensitivität aufweist, da hier keine Laufgeschwindigkeiten enthalten sind. Für ein Belastungsmonitoring sollte daher größeres Augenmerk auf Belastungsspitzen gelegt werden, da mittlere Belastungen scheinbar nicht ausreichen, um einen relevanten Anstieg von Muskelenzymen wie der CK zu bewirken.

Anders als für die CK, konnten für das CRP und die LDH relevante positive Korrelationen mit der Spielzeit zum MZP 2 gefunden werden. Demnach fand mit steigender Intervallspielzeit (CRP%, LDH%) bzw. 8-Tage-Spielzeit (LDH%) ein Anstieg des CRPs bzw. der LDH statt. Wie aus Abb. 16 hervorgeht, stieg das CRP insbesondere bei hohen Belastungen (> 400 Spielminuten) an. Im mittleren Belastungsniveau (300–400 Spielminuten) unterschieden sich die CRP-Werte dagegen, mit Ausnahme eines Spielers, kaum von denjenigen im unteren Belastungsniveau (ca. 100 Spielminuten). Der Pearson-Korrelationskoeffizient lag hier bei $r = 0,645$ und somit über dem kritischen r -Wert von 0,602. Dieser Trend konnte jedoch nur zum 2. MZP und lediglich für die Intervallspielzeit beobachtet werden. Da das CRP einen sehr akuten Parameter darstellt, führen auch hier, ähnlich wie bei der CK, kurzfristige Belastungsspitzen zu stark erhöhten Werten (Kasapis und Thompson, 2005). Zudem gibt es eine Vielzahl weiterer Faktoren, die das CRP-Level beeinflussen können. Dazu zählen unter anderem Alter, Gewicht, Serum-Lipidkonzentration, Rauchen, Blutdruck, genetische Faktoren, Muskelschädigungen sowie akute und chronische Infektionen oder Krankheiten (Sproston und Ashworth, 2018). So fanden beispielsweise Pankow et al. (2001) in einer

großen Querschnittsstudie in den USA, dass 35–40% der CRP-Konzentration durch genetische Faktoren bestimmt wird.

Die chronischen Auswirkungen fußballspezifischer Belastungen auf den CRP-Wert sind in der Literatur umstritten. In einer Studie mit 19 serbischen Fußballspielern konnte ein schwach signifikanter Anstieg der CRP-Konzentration über eine Halbsaison festgestellt werden ($p = 0,08$) (Anđelković et al., 2015), während in anderen Studien keine relevanten Veränderungen des CRP über einen längeren Zeitraum gefunden werden konnten (Kasapis und Thompson, 2005; Siahkouchian und Esmaeilzadeh, 2011; Meyer et al., 2013). Über einen Zeitraum von sechs Wochen in der Vorsaison von 24 Fußballspielern ergab sich dagegen eine relevante Abnahme der CRP-Konzentration (Coppalle et al., 2019). In der gleichen Studie konnte zudem eine hohe negative Korrelation ($r = -0,863$) zwischen gelaufener Gesamtstrecke mit Laufgeschwindigkeit > 20 km/h und der Serum-CRP-Konzentration gefunden werden. Eine hohe Belastung führte hier also eher zu einer Abnahme der CRP-Konzentration. Allerdings wurde dabei die Vorsaison untersucht, weshalb ein direkter Vergleich mit dieser Studie schwierig ist.

Bei den Spielern des HFC wurde über den Saisonverlauf ein schwacher CRP-Anstieg zwischen MZP 1 und 2 ($d = 0,42$) bzw. zwischen MZP 1 und 3 ($d = 0,42$) festgestellt. Zwischen MZP 2 und 3 ließ sich dagegen kein zusätzlicher, kumulativer Ermüdungseffekt erkennen ($d = -0,11$). Zwei Spieler zeigten zudem Werte von über 2 mg/dl an und lagen somit weit über dem Mannschaftsdurchschnitt (Abb. 25). Die Ursachen für diese erhöhten CRP-Konzentrationen sind vielfältig. Eine Infektion oder Verletzung, aber auch ein Übertraining aufgrund mangelnder Erholungsphasen könnte hier für den Anstieg verantwortlich sein. Insbesondere da ein Spieler über alle drei MZP Werte zwischen 1,1 und 3,6 mg/dl aufwies, sind hier andere Ursachen nicht auszuschließen. Vergleicht man allerdings die Spielzeiten dieser beiden Spieler (Tab. 18), fällt auf, dass Spieler B vor MZP 2 weit weniger Spielbelastung erfahren hat als Spieler A. Dennoch lag der CRP-Wert bei 3,6 mg/dl gegenüber 1,4 mg/dl, was jedoch beides über dem Referenzwert ($\leq 0,8$ mg/dl) liegt. Daher ist das Vorliegen eines akuten Infektes oder einer Entzündungsreaktion bei Spieler B zum MZP 2 naheliegender. Zum MZP 3 stieg die CRP-Konzentration von Spieler A weiter an und lag schließlich mit 2,3 mg/dl über der von Spieler B. Jedoch zeigte Spieler A auch eine weit höhere Intervallspielzeit, Spieler B dagegen eine höhere 8-Tage-Spielzeit (Tab. 18). Diese Einzelfalldarstellung demonstriert die große Beeinflussbarkeit und Variation der CRP-Konzentrationen. Grundlegende Informationen zum Gesundheitsstatus der Probanden sind daher vor jeder Messung zwingend erforderlich, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

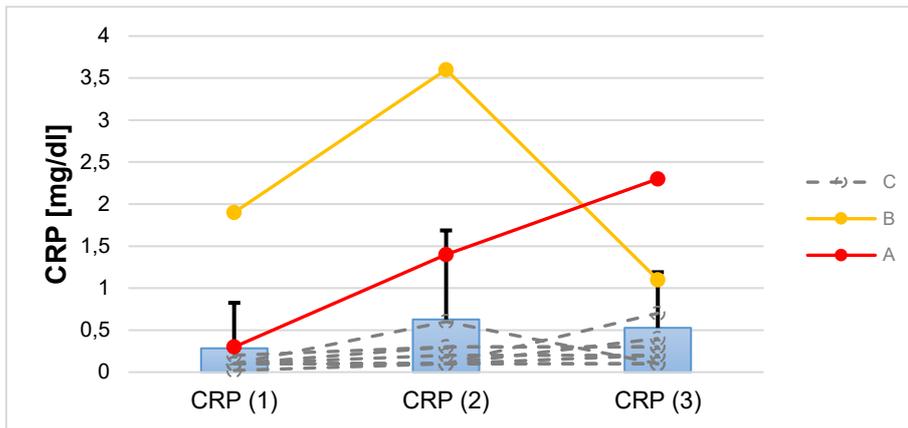


Abb. 25: CRP-Konzentrationen der einzelnen Spieler im Saisonverlauf. Ein Spieler (B) zeigte stark erhöhte Werte zu MZP 1 und 2, ein anderer Spieler (A) dagegen zu MZP 3. Die übrigen Spieler (C) erreichten nur Werte bis maximal 0,6 mg/dl. Die beiden Spieler A und B entsprechen nicht den Spielern A und B aus Abb. 24.

Tab. 18: Spielzeiten [min] und CRP-Werte [mg/dl] der Spieler A und B. ISZ = Intervallspielzeit; 8-TSZ = 8-Tage-Spielzeit.

	ISZ 1–2	8-TSZ 2	CRP 2	ISZ 2–3	8-TSZ 3	CRP 3
Spieler A	504	144	1,4	745	83	2,3
Spieler B	125	80	3,6	366	163	1,1

LDH% korrelierte zum 2. MZP sowohl mit der Intervallspielzeit ($r = 0,589$; Abb. 17), als auch mit der 8-Tage-Spielzeit ($r = 0,783$; Abb. 18) positiv. Anders als beim CRP fielen jedoch die Veränderungen der LDH-Konzentrationen relativ gering aus. Oberhalb von 300 Spielminuten Intervallspielzeit konnten Anstiege um ca. 20–40% bei vier von fünf Spielern festgestellt werden. Die Hälfte der Spieler wies jedoch nur schwache Veränderungen auf, weshalb auch beim Mittelwertvergleich keine deutlichen Unterschiede vorhanden waren. Beim Vergleich mit der 8-Tage-Spielzeit war die größte Korrelation zu beobachten ($r = 0,783$). Dennoch ergab sich zum 3. MZP auch hier keine relevante Korrelation, was jedoch auch der geringeren Belastungsdichte vor MZP 3 (Kapitel 4.1; Abb. 14) geschuldet sein kann. Nowakowska et al. (2019) konnten keine relevanten Korrelationen zwischen der kumulativen Spielzeit und der Serum-LDH-Konzentration bei 20 professionellen Fußballspielern über eine Gesamtsaison finden. Es zeigte sich außerdem eine Abnahme der LDH-Konzentration über den Saisonverlauf. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten Anđelković et al. (2015), welche eine LDH-Abnahme bei 19 serbischen Fußballspielern über 90 Tage feststellten. Eine andere Studie ergab jedoch bei einer Gruppe von 26 Fußballspielern einen LDH-Anstieg innerhalb von sechs Wochen vor Saisonbeginn (Coppalle et al., 2019). Zudem zeigten sich in dieser Studie eine nahezu perfekte positive Korrelation ($r = 0,974$; $n = 17$) zwischen LDH und RPE (*rate of perceived effort* = Fragebogen zur subjektiven Beanspruchung) sowie relevante Korrelationen zwischen der insgesamt gelaufenen Strecke und LDH ($-0,808 \leq r \leq 0,425$).

Wilson et al. (2009) fanden in einer Studie mit 16 sportlich aktiven Männern einen Anstieg von LDH nach maximaler exzentrischer Belastung um das etwa Zweieinhalbfache. Die Serum-Konzentration stieg dabei kontinuierlich bis 72 Stunden nach Belastung an, wobei danach keine weiteren Messungen stattfanden. Ein weiterer Anstieg über 72 Stunden hinaus ist somit nicht auszuschließen. Bei einer Gruppe von 15 Männern verdoppelte sich die Serum-LDH-Konzentration direkt nach einem Marathonlauf und blieb sogar über zwei Wochen erhöht (Kobayashi et al., 2006). In einer anderen Studie über sechs sportlich aktive Frauen zeigte sich nach exzentrischem Armtraining ein signifikanter Anstieg von LDH erst nach 48 Stunden mit Peak-Werten um den 3. bis 5. Tag (Nosaka et al., 1992). Dass exzentrische Belastung einen weitaus stärkeren Effekt auf die LDH-Konzentration und andere Ermüdungsmarker hat, zeigten unter anderem Brown et al. (1999). Nachdem konzentrische Kraftübungen der Knieextensoren in einer Gruppe von neun untrainierten Männern zu keiner Erhöhung von Muskelenzymen führte, zeigten sich nach exzentrischen Übungen derselben Muskelgruppen ein relevanter Anstieg vom 3. bis zum 7. Tag.

Insgesamt schien besonders die akute Belastung (8-Tage-Spielzeit) einen Effekt auf die LDH-Konzentration zu haben, was aber aufgrund der fehlenden Korrelation zum MZP 3 weiter untersucht werden muss. Jedoch war die Belastungsdichte vor MZP 2 höher als vor MZP 3 (Kapitel 4.1; Abb. 14), was auch einen Grund für die fehlende Korrelation sein kann. Allerdings deuten die relativ geringen Anstiege darauf hin, dass die erfahrene Belastung nicht ausreichend hoch war, um einen deutlichen Effekt auf die LDH-Werte zu erzielen. Obwohl Fußball viele exzentrische Belastungskomponenten enthält (Ispirlidis et al., 2008), scheint das Monitoring von LDH nicht ausreichend zu sein, um den Ermüdungsstatus zu bestimmen. Da die LDH zudem durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden kann, müssen diese bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Auch IGF-1 zeigte nur geringe Veränderungen über den Saisonverlauf ($d_{MZP1-2} = 0,29$ bzw. $d_{MZP1-3} = 0,39$), jedoch keine relevanten Korrelationen mit der Spielzeit. Zudem konnten keine Unterschiede zwischen Spielern mit hohen Spielbelastungen und Spielern mit niedrigen Spielbelastungen beobachtet werden. Sowohl Anstiege, als auch Abnahmen sowie konstante Verläufe fanden unabhängig von den kumulativen Spielzeiten statt. Die Belastung in Form von Spielminuten schien also keinen relevanten Einfluss auf das Serum-IGF-1 gehabt zu haben. Neben dem fehlenden Zusammenhang zwischen Belastung und IGF-1, könnte jedoch auch die Verteilung von IGF-1 im Serum durch seine verschiedenen Bindeproteine dazu geführt haben, dass kein direkter Anstieg messbar war (Nindl et al., 2001). Andere Möglichkeiten sind die unzureichende Belastungshöhe oder die schnelle Regeneration mit Rückkehr auf das Ausgangsniveau.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten Mejri et al. (2005), welche keine signifikanten Veränderungen der IGF-1-Werte über den Saisonverlauf von 13 jugendlichen Fußballspielern beobachteten. Dagegen konnten Hammami et al. (2018) einen signifikanten Anstieg von IGF-1 über den Saisonverlauf sowie einen deutlich erhöhten Serum-Spiegel im Vergleich zu einer Kontroll-Gruppe in einer Studie mit 18 jugendlichen Fußballspielern der tunesischen U17 Nationalmannschaft feststellen. Die Datenlage zu hormonellen Veränderungen im Fußball ist jedoch schlecht und bedarf weiterer Untersuchung (Hammami et al., 2018). In einer weiteren Studie wurden Laborparameter und maximale Herzfrequenz von jugendlichen Fußballspielern nach einer Reihe von *small sided games* (Fußballspiele mit weniger als elf Spielern pro Mannschaft) untersucht (Alashti et al., 2020). Hierbei konnte ebenfalls ein signifikanter IGF-1-Anstieg unmittelbar nach den Spielen festgestellt werden. Die genannten Studien untersuchten allerdings die IGF-1-Konzentration innerhalb der ersten Stunden nach sportlicher Aktivität, was einen deutlichen Unterschied zu der hier durchgeführten Studie darstellt. Studien zu hormonellen Veränderungen der IGF-1-Achse im Zusammenhang mit anderen Sportarten existieren zwar, die Übertragbarkeit auf die fußballspezifischen Belastungen ist aber fragwürdig. So konnte in einer Studie mit 34 jungen Männern in den ersten acht Stunden nach intensivem Krafttraining kein signifikanter Unterschied in den IGF-1-Konzentrationen festgestellt werden (Hasani-Ranjbar et al., 2012). Ebenso fanden Kraemer et al. (1995) keine signifikanten Veränderungen der IGF-1-Werte nach intensivem Krafttraining. Stattdessen wurde aber ein signifikanter Anstieg des Wachstumshormons (GH) beobachtet.

Die Laborparameter CRP% und LDH% korrelierten zwar am 2. MZP mit der Spielbelastung, dennoch besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen kumulativer Belastung und Laborwertveränderungen. Zudem erscheint die Spielminutenzahl als alleiniger Belastungsparameter ungeeignet, um die insgesamt erfahrene Belastung zu messen.

Posturographie (IBS)

Der WDI (PC) zeigte sich über den Saisonverlauf konstant, weshalb keine deutlichen Mittelwertunterschiede festzustellen waren. Der ST (PC) fiel dagegen leicht ab ($d_{\text{MZP1-2}} = -0,41$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = -0,37$). Die Korrelationsanalyse nach Pearson ergab bei keinem der beiden Parameter relevante Korrelationen ($r > |0,5|$) mit der Spielzeit. Lediglich eine mittlere negative Korrelation ergab sich mit der Intervallspielzeit ($r = -0,456$) und der 8-Tage-Spielzeit ($r = -0,331$) für den ST (PC) zum MZP 2. Eine steigende Spielbelastung führte zum MZP 2 also eher zu einer Abnahme von ST (und damit einer Zunahme der posturalen Stabilität), was aber aufgrund der geringen Korrelation und Stichprobengröße

wenig aussagekräftig ist. Alle weiteren Korrelationen lagen bei $r < |0,2|$ und zeigten somit keinen Zusammenhang zwischen Spielbelastung und posturaler Stabilität.

Obwohl es einige Studien zur Gleichgewichtskontrolle nach sportlichen Belastungen gibt, konnten keine Studien zur Entwicklung der Gleichgewichtskontrolle über den Saisonverlauf gefunden werden. So zeigte sich in einer Studie mit neun Sportlern, dass die posturale Stabilität direkt nach einem 25-Kilometer-Lauf signifikant abnahm (Lepers et al., 1997). Andere Studien kamen zu ähnlichen Ergebnissen, wobei lediglich auf beweglicher Messplatte (dynamische Posturographie) und mit geschlossenen Augen bzw. auf einem Bein stehend bei geöffneten Augen eine Abnahme der posturalen Stabilität auftrat (Zemková et al., 2007; Pau et al., 2014). Die drei genannten Studien untersuchten aber lediglich kurzfristige Veränderungen der posturalen Stabilität nach körperlicher Belastung, nicht jedoch über mehrere Trainingseinheiten und Spiele hinweg. Zudem kamen andere Untersuchungssysteme als das IBS zum Einsatz, was einen Vergleich zusätzlich erschwert. Gioftsidou et al. (2006) fanden in einer Studie mit 39 jugendlichen Fußballspielern, dass die Kontrollgruppe (13 Spieler, kein Gleichgewichtstraining) keine Veränderung der posturalen Stabilität nach zwölf Wochen regelmäßigen Fußballtrainings aufwies. Spezielles Gleichgewichtstraining vor oder nach einer Trainingseinheit führte dagegen zu einer signifikanten Verbesserung der posturalen Stabilität ($p < 0,01$). Eine verminderte posturale Stabilität nach sportlicher Aktivität kann unter anderem durch veränderte kardiorespiratorische Funktion, Freisetzung von muskulären Metaboliten und Flüssigkeitsumverteilung erklärt werden (Paillard, 2012). Die kompensatorische Hyperventilation nach Laktatanreicherung könnte hier eine Schlüsselrolle einnehmen (Zemková et al., 2007). Paillard (2012) stellte fest, dass die Gleichgewichtskontrolle abnahm, sobald Sportler die anaerobe Schwelle übertrafen oder eine Abnahme der maximalen Kontraktion um mindestens 25–30% erfuhren. Butler et al. (2008) zeigten zudem, dass eine schwache Beinmuskulatur mit einer verminderten posturalen Stabilität in Verbindung steht, möglicherweise durch eine funktionale Verbindung zwischen motorischen und sensorischen Muskelfasern. Im Umkehrschluss könnte also eine erhöhte Beinkraft zu einer verbesserten posturalen Stabilität führen, was auch ein Erklärungsansatz für das verringerte Verletzungsrisiko bei erhöhter Relativkraft der unteren Extremitäten darstellt (Kapitel 1.1; Abb. 1c). Eine verminderte Haltungs- und Gleichgewichtsregulation sowie eine schwache Beinmuskulatur als Risikofaktor für Knöchelverletzungen wurde zudem durch Henry et al. (2016) in einer Studie mit 210 Amateurfußballern bestätigt. Dass eine suffiziente Beinkraft mit einer verbesserten Gleichgewichtskontrolle korreliert steht jedoch nicht im Einklang mit den Ergebnissen in dieser Studie. Hier wurden positive Korrelationen

zwischen der Sprunghöhe bei den Drop Jumps und ST (PC) (also eine Abnahme der posturalen Stabilität mit steigender Sprunghöhe) gefunden.

Dass keine relevanten Korrelationen zwischen posturaler Stabilität und Spielzeit gefunden wurden, kann verschiedene Gründe haben. Einerseits lag zwischen dem letzten Spiel und dem Messtag ein Abstand von 48 bis 72 Stunden, in denen möglicherweise eine (nahezu) vollständige Erholung stattfand. Andererseits war vermutlich keine ausreichend hohe Belastung gegeben, um die Gleichgewichtskontrolle wesentlich zu verändern. Obwohl bei anderen Parametern wie der CK und dem CRP teilweise starke Anstiege zu verzeichnen waren, was auf eine muskuläre Beanspruchung schließen lässt, schien die posturale Stabilität nicht davon beeinflusst zu werden. Die Veränderung der posturalen Stabilität innerhalb der ersten Stunden bis Tage nach sportlicher Aktivität sollte daher näher untersucht werden.

Drop Jumps

Beim Vergleich der Sprunghöhen mit den Spielzeiten, ergaben sich zum MZP 3 relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$) mit den DJ bb% und den DJ li%. Während für die DJ bb die Korrelation mit der 8-Tage-Spielzeit deutlicher war ($r = 0,706$), lag für die DJ li nur eine relevante Korrelation mit der Intervallspielzeit vor ($r = 0,602$). Insgesamt wurden bei den DJ li zudem deutlich größere Unterschiede (-8 bis +30%) der Sprunghöhen zum Ausgangsniveau festgestellt als bei den DJ bb (-10 bis +10%). Ein belastungsinduzierter Effekt erscheint also für die DJ li wahrscheinlicher als für die DJ bb, welche kaum Unterschiede zur Baseline vorwiesen. Auch die DJ re% zeigten zum MZP 3 einen positiven Zusammenhang mit der 8-Tage-Spielzeit ($r = 0,495$), welcher jedoch knapp unterhalb der gewählten Relevanzgrenze lag. Dass gerade die DJ li mit der Spielzeit korrelieren, könnte unter anderem durch die Seitenpräferenz der Spieler erklärt werden. Zehn der elf getesteten Spieler hatten ihr rechtes Bein als ihre dominante Seite angegeben, nur ein Spieler das linke Bein. Möglicherweise war die Belastung auf das linke Bein bei der Mehrzahl der Spieler geringer, was eine schnellere Regeneration mit möglicher Superkompensation zur Folge hatte. Dagegen könnte das rechte Bein durch den häufigen Ballkontakt stärker von Ermüdungserscheinungen betroffen gewesen sein, weshalb eine positive Korrelation mit der Spielzeit ausblieb. Die Belastung war aber anscheinend nicht ausreichend hoch, um eine Abnahme der Sprunghöhe zu verursachen. Andererseits könnte die Erholungsphase von 48 bis 72 Stunden bereits zu einer (nahezu) vollständigen Regeneration geführt haben, was auch die schwachen Korrelationen ($r < |0,3|$) zum MZP 2 erklären könnte.

Dass nach einem Fußballspiel aufgrund muskulärer Ermüdung eine Abnahme der Sprunghöhe innerhalb der ersten Tage zu verzeichnen ist, konnte bereits mehrfach in

Studien nachgewiesen werden (Ispirlidis et al., 2008; Brownstein et al., 2017; McHugh et al., 2019). Während einige Autoren eine Rückkehr auf Baseline-Niveau nach 48 (Brownstein et al., 2017) bis 72 Stunden (Ispirlidis et al., 2008) nach einem Spiel beschreiben, war bei anderen auch nach 69 bzw. 72 Stunden noch nicht das Ausgangsniveau erreicht (Andersson et al., 2008; Magalhães et al., 2010). Die genannten Studien überprüften die Sprunghöhe jedoch mittels *Counter Movement Jumps* (CMJ), was einen Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie (*Drop Jumps*) erschwert. In einer Studie mit 14 jugendlichen Fußballspielern wurde eine deutliche Abnahme der Sprunghöhe bei den Drop Jumps 24 und 48 Stunden nach einer intensiven Trainingseinheit festgestellt, was für die *Counter Movement Jumps* sowie für die *Squat Jumps* dagegen nicht der Fall war (Fitzpatrick et al., 2019). Die Sprunghöhen der U17 HFC-Spieler ergaben 48 bis 72 Stunden nach dem letzten Spiel weder zum MZP 2, noch zum MZP 3 relevante Unterschiede gegenüber der Baseline. Die Tendenz war sogar leicht steigend für die DJ links ($d_{\text{MZP1-3}} = 0,31$) und rechts ($d_{\text{MZP1-2}} = 0,39$ bzw. $d_{\text{MZP1-3}} = 0,28$), was jedoch aufgrund des geringen Ausmaßes vernachlässigbar war. Dies steht jedoch im Einklang mit den Ergebnissen von Brownstein et al. (2017) bzw. Ispirlidis et al. (2008), da zu diesem Zeitpunkt scheinbar eine (nahezu) vollständige Regeneration der Beinmuskulatur stattgefunden hat. Der leichte Anstieg der DJ links und rechts könnte durch eine verbesserte Muskelkraft im Saisonverlauf, aber auch durch eine veränderte Sprungtechnik bei Durchführung der Drop Jumps erklärt werden. Ein deutlicher kumulativer Belastungs- bzw. Ermüdungseffekt auf die Beinmuskulatur über den Saisonverlauf konnte bei den Sprunghöhen nicht ausgemacht werden. Hier könnten möglicherweise andere Verfahren wie der DJ-RSI (*Drop Jump Reactive Strength Index*), welcher eine höhere Sensitivität für belastungsabhängige Ermüdung aufweist (Fitzpatrick et al., 2019), besser für die Ermüdungsdiagnostik geeignet sein. Insgesamt zeigen die Ergebnisse also eher eine Zunahme der Sprunghöhe mit steigender Spielbelastung. Da relevante positive Korrelationen aber nur zum MZP 3 bestanden, scheint ein kausaler Zusammenhang eher unwahrscheinlich.

Korrelationen zwischen leistungsphysiologischen Parametern

Laborwerte vs. WDI (PC)

Die negativen Korrelationen zwischen CK und WDI (PC) zu den MZP 1 ($r = -0,688$) und 3 ($r = -0,673$) deuten auf eine steigende posturale Stabilität mit steigender CK-Konzentration hin (eine Abnahme des WDI ist mit einer Zunahme der Stabilität assoziiert). Dieses Ergebnis erscheint vor dem Hintergrund, dass ein hoher CK-Wert mit einer muskulären Ermüdung einhergeht (Russell et al., 2015), welche wiederum mit einer

geringeren posturalen Stabilität assoziiert ist (Zemková et al., 2007; Pau et al., 2014), zunächst ungewöhnlich. Ein Erklärungsansatz wäre, dass Spieler mit hohen CK-Werten eine stärker ausgeprägte Muskulatur der unteren Extremitäten (Brancaccio et al., 2007) und somit eine bessere Gleichgewichtskontrolle besitzen. Die Ergebnisse der Drop Jumps sowie anderer Studien (Ispirlidis et al., 2008; Brownstein et al., 2017) legen zudem eine (fast) vollständige muskuläre Erholung 48 bis 72 Stunden nach einem Spiel nahe. Da die Messungen jeweils ca. 48 bis 72 Stunden nach dem letzten Spiel (MZP 2 und 3) durchgeführt wurden, kann von einer (nahezu) vollständigen Regeneration der Gleichgewichtskontrolle ausgegangen werden. Leider konnten keine Studien zur direkten Verbindung zwischen CK und posturaler Stabilität bzw. zur Entwicklung der posturalen Stabilität nach sportlicher Belastung gefunden werden (Stand 07/2022).

Auch konnte eine relevante negative Korrelation zwischen LDH und WDI (PC) zum MZP 1 ($r = -0,675$) sowie mittlere negative Korrelationen zu den MZP 2 ($r = -0,343$) und 3 ($r = -0,458$) gefunden werden. Somit könnte auch ein LDH-Anstieg mit einer Zunahme der Gleichgewichtskontrolle assoziiert sein. Dies ist jedoch kein überraschendes Ergebnis, da ein Anstieg von CK nach muskulärer Beanspruchung meist mit einem Anstieg von LDH einhergeht (Ispirlidis et al., 2008; Wilson et al., 2009; Callegari et al., 2017).

Die Korrelationen zwischen IGF-1 und WDI (PC) zeigten zwar zu den MZP 1 und 2 relevante Beträge, jedoch änderte sich das Vorzeichen von negativ auf positiv, was eher auf einen Zufall schließen lässt. Von einem linearen Zusammenhang kann hier nicht ausgegangen werden.

Laborwerte vs. ST (PC)

Zwischen Laborwerten und ST (PC) konnten mit Ausnahme von LDH zum MZP 3 ($r = 0,636$) keine relevanten Korrelationen festgestellt werden. Eine erhöhte LDH-Konzentration ging also zum MZP 3 mit einer Abnahme der posturalen Stabilität einher. Da LDH jedoch nur zum MZP 3 positiv mit ST (PC) korrelierte, an den anderen beiden MZP jedoch nur Korrelationen von $r < |0,3|$ vorhanden waren, kann hier von keinem linearen Zusammenhang ausgegangen werden. Auch hier besteht ein großes Forschungsdefizit, weshalb Vergleiche mit ähnlichen Untersuchungen nicht möglich waren.

DJ vs. ST (PC)

Obwohl Chtara et al. (2018) zufolge die posturale Stabilität mit einer erhöhten isometrischen Muskelkraft der unteren Extremitäten assoziiert ist, konnten zu allen drei MZP positive relevante Korrelationen zwischen Sprunghöhe (*Drop Jumps*) und ST (PC)

(und damit einer Abnahme der posturalen Stabilität) gefunden werden. Da in dieser Studie jedoch die Reaktivkraft in Form von Drop Jumps gemessen wurde, ist hier ein direkter Vergleich schwierig. In einer Studie mit 49 männlichen Basketballspielern zeigten sich dagegen keine relevanten Korrelationen zwischen der Sprunghöhe (*Drop Jumps*, *Squat Jumps*, *Counter Movement Jumps*) und der Gleichgewichtskontrolle bei „statischer“ Posturographie (Jallai et al., 2012). Goktepe et al. (2016) fanden zwar signifikante, jedoch nur schwache ($r < 0,3$) bis mittlere ($0,3 \leq r < 0,5$) Korrelationen zwischen der Sprunghöhe bei Drop Jumps und der „statischen“ Gleichgewichtskontrolle in einer Studie mit 46 männlichen Athleten. Bei der U17 des HFC bewegten sich die Korrelationen zwischen $r = 0,411$ und $r = 0,744$, weshalb hier ein mittlerer bis starker Effekt angenommen werden kann. Die deutlichste Korrelation zeigte sich bei den DJ bb zum MZP 2 ($r = 0,744$), wohingegen die DJ li die am wenigsten relevanten Korrelationen ($0,546 \leq r \leq 0,579$) aufwiesen (jedoch als einziger Parameter zu allen drei MZP mit $r > 0,5$). Insgesamt lagen alle Korrelationen bei $r > 0,41$. Eine höhere Reaktivkraft schien hier also mit einer posturalen Instabilität in Verbindung zu stehen. Zwischen den DJ und dem WDI (PC) zeigten sich dagegen zu keinem Zeitpunkt relevante Korrelationen.

5.2 Methodendiskussion (Limitationen)

Da im Spitzensportbereich ein enormer Leistungs- und Zeitdruck für Sportler und Trainer besteht, ist eine Rekrutierung großer Stichprobenzahlen für wissenschaftliche Studien äußerst schwierig. Darüber hinaus kommt es häufig zu verletzungsbedingten Ausfällen oder mangelnder Compliance, wodurch sich die Stichprobenzahl weiter verringern kann. Verschiedene Gründe haben schließlich dazu geführt, dass die ursprünglich rekrutierte Spielerzahl von 21 auf elf reduziert werden musste, um vollständige Datensätze für die Auswertung zu erhalten. Zwar gibt es gerade im Spitzensportbereich viele Studien mit geringen Teilnehmerzahlen, dennoch ist dadurch die Aussagekraft der Ergebnisse stark eingeschränkt und bedarf weiterer Untersuchungen mit größeren Stichprobenzahlen.

Ein weiteres Problem stellte die Anzahl an Messungen dar. Es gab insgesamt drei MZP zwischen Juli 2017 und November 2017. Die Schwierigkeit dabei war es, Termine zu finden, die mit Training, Spieltagen und Schule vereinbar waren. Der Leistungsdruck ist zudem besonders während der Saison enorm hoch, weshalb es jede Zusatzbelastung möglichst zu vermeiden gilt. Ein dichteres Messschema wäre also wünschenswert, ist aber nur schwer umsetzbar. Die ursprünglich geplante Studie über die Gesamtsaison 2017/18 konnte nicht wie geplant durchgeführt werden, da wegen technischer Probleme ein Messtag abgebrochen werden musste. Ein Ersatztermin konnte aufgrund der hohen Spieldichte nicht gefunden werden. Auch ergaben sich große Datenlücken zum 4. MZP,

weshalb dieser nicht in die Auswertung einging. Somit blieb die weitere Entwicklung der gemessenen Parameter unerforscht.

Aufgrund der z. T. zeitaufwändigen Tests konnten nicht alle Probanden am selben Tag einbestellt werden, weshalb die Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen stattfanden. Da jedoch manche der erhobenen Parameter stark von akuter Belastung bzw. Ermüdung beeinflusst werden, kann ein Zeitunterschied von 24 Stunden einen bedeutenden Einfluss auf das Messergebnis haben. Insbesondere Laborwerte wie die CK und das CRP zeigen starke Veränderungen innerhalb der ersten Tage nach einem Spiel, weshalb hier ein einheitlicher MZP (soweit möglich) sinnvoll wäre. Da die Teilnehmerzahl jedoch zu Beginn der Studie mit 21 Spielern noch weitaus größer war, mussten die Messungen auf zwei Tage verteilt werden.

Weitere Limitationen sind die Sensitivität und Spezifität der erhobenen Parameter. Wie zuvor beschrieben gibt es eine große interindividuelle Variabilität, insbesondere der CK-Konzentrationen. Auch ist die Spezifität der Laborparameter durch eine Vielzahl von Störfaktoren eingeschränkt. Beispielsweise können akute Muskelverletzungen zur erhöhten Freisetzung von CK und LDH führen und so das Ergebnis verfälschen (Palacios et al., 2015). Andererseits können Low-Responder unverhältnismäßig geringe CK-Anstiege auch bei hoher Belastung erfahren, was somit diesen Parameter in seiner Aussagekraft einschränkt (Brancaccio et al., 2010). Infekte und Entzündungen können ebenfalls zu großen Veränderungen von Laborparametern, insbesondere des CRPs, führen und müssen vor der Messung ausgeschlossen werden (Sproston und Ashworth, 2018).

Dass die posturographischen Parameter WDI und ST keine relevanten Veränderungen nach Belastung ergaben, könnte auf eine geringe Sensitivität in diesem Kontext (Ermüdung und Erholtheit) hindeuten. Möglicherweise hätte eine Messung mit zusätzlichem Störfaktor (z. B. Einbeinstand, veränderte Kopfposition etc.) die muskuläre Ermüdung besser widerspiegeln können. Andererseits war vermutlich die Regenerationszeit von 48 bis 72 Stunden ausreichend hoch, sodass keine Ermüdungszeichen in der Posturographie zu erkennen waren. Diese Methode scheint also keine kumulativen Ermüdungseffekte identifizieren zu können. Die posturale Kontrolle wird außerdem durch andere Faktoren wie Schlafentzug (Bougard et al., 2011), sportliches Leistungsniveau und Atemtechnik (Schwesig et al., 2009) beeinflusst. Auch scheint der Tageszeitpunkt eine Rolle bei der Gleichgewichtskontrolle zu spielen (Bougard et al., 2011). Eine posturographische Ermüdungs- bzw. Erholtheitsdiagnostik sollte daher unter möglichst gleichen Voraussetzungen (Tag, Uhrzeit, Erholungsdauer etc.) und unter erschwerten Bedingungen (Erhöhung der Sensitivität) durchgeführt werden.

Sowohl die Trainingstagebücher als auch die REGman-Fragebögen konnten nicht in die Auswertung eingehen, da aufgrund mangelnder Compliance der Spieler keine ausreichende Vollständigkeit gegeben war. Zudem wurden Trainingstagebücher und REGman-Fragebögen vorzeitig eingestellt (17.11.2017 bzw. 22.01.2018), da die Dokumentation zu unvollständig stattfand und das Interesse dieser Studie primär objektiven Parametern galt. Zwar ist mithilfe von Fragebögen und Trainingstagebüchern eine relativ kostengünstige und einfache Erfassung von Belastung und Beanspruchung möglich, allerdings stellen die fehlende Objektivität und potentielle Manipulationen durch den Athleten ein Problem dar (Halson, 2014). Die Häufigkeit und Länge der Fragebögen sollte sorgfältig gewählt werden, um eine mangelnde Compliance zu vermeiden. Eine mögliche Variante, welche die subjektiv empfundene Erholung und Beanspruchung auf praktikable und effektive Art und Weise darzustellen vermag, ist die Kurzsкала Erholung und Beanspruchung (KEB, Anlage 3). Hierbei werden lediglich acht Parameter (verglichen zu 32 Parametern beim REGman-Fragebogen) erfragt, die von den Spielern auf einer Skala von 0 (gar nicht zutreffend) bis 6 (voll zutreffend) bewertet werden müssen. Die Fragebögen sowie die Auswertung kann über eine Software oder App erfolgen, was sowohl die Compliance erhöhen, als auch die Auswertung erleichtern kann.

Die körperliche Belastung wurde in Form von Spielminuten zwischen zwei MZP bzw. innerhalb der letzten acht Tage vor einem MZP dargestellt. Dabei wurden jedoch einige Faktoren nicht beachtet, die großen Einfluss auf die Belastungsintensität haben können. Unter anderem spielen Laufstrecke, Laufgeschwindigkeit, Anzahl der Sprints, Anzahl der Beschleunigungen und Spielerposition eine entscheidende Rolle. Andererseits sind auch die Trainingseinheiten entscheidend für die insgesamt erfahrene Belastung. Weitere fußballunabhängige Faktoren wie schulischer Stress, mangelnde Motivation, emotionale Geschehnisse etc. könnten ebenfalls einen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Weiterhin hätte ein Vergleich mit einer Kontrollgruppe eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse liefern können. Dies hätte allerdings einen hohen zeitlichen und finanziellen Mehraufwand bedeutet, was die für diese Studie zur Verfügung stehenden Mittel gesprengt hätte. Bei den 8-Tage-Spielzeiten zeigten sich zudem große Unterschiede in der Spieldichte unmittelbar vor den MZP 2 und 3 (Kapitel 4.1; Abb. 14), was große Auswirkungen auf die Parameter-Responses aufgrund unterschiedlicher Erholungsphasen haben könnte.

6 Zusammenfassung

Da körperliche Ermüdung und Belastung mit einem erhöhten Verletzungsrisiko assoziiert sind, besteht ein großes sportmedizinisches Interesse in der Identifizierung zuverlässiger, valider und praktikabel zu erfassender Ermüdungsparameter. Obwohl bereits einige Studien zur Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik existieren, konnte bis heute kein einzelner Parameter identifiziert werden, der hinreichend objektiv, reliabel und valide ist. Zudem führen häufig angewandte motorische Tests zu einer zusätzlichen Belastung für Athleten und sind daher im Saisonverlauf kontraproduktiv.

Ziel dieser Studie war es daher, die Belastung und Beanspruchung einer U17 Fußballmannschaft durch verschiedene leistungsphysiologische Parameter zu erfassen und neue Ansätze für die Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik aufzuzeigen.

Es wurden elf männliche Spieler der U17 Fußballmannschaft des Halleschen FC während der Saison 2017/18 untersucht. An insgesamt drei Messzeitpunkten (MZP) zwischen Juli 2017 und November 2017 wurden Laborwerte (CK, CRP, LDH und IGF-1), Sprunghöhen (Drop Jumps) sowie die posturale Stabilität gemessen. Es folgte eine Korrelationsanalyse zwischen den Spielzeiten (Intervallspielzeit bzw. 8-Tage-Spielzeit) und den erfassten leistungsphysiologischen Parametern, welche prozentual vom Ausgangsniveau (MZP 1) betrachtet wurden.

Bei den Laborparametern zeigten sich relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$) sowohl zwischen der Intervallspielzeit und CRP% ($r = 0,645$) sowie LDH% ($r = 0,589$), als auch zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% ($r = 0,783$) zum MZP 2. Zum MZP 3 ergaben sich relevante positive Korrelationen zwischen der Intervallspielzeit und den DJ bb% ($r = 0,544$) sowie den DJ li% ($r = 0,602$). Auch gab es zum MZP 3 eine hohe positive Korrelation zwischen der 8-Tage-Spielzeit und den DJ bb% ($r = 0,706$). Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen Sprunghöhe und posturaler Instabilität ($0,411 \leq r \leq 0,744$) gefunden werden. Die Laborparameter CK und IGF-1 sowie die posturale Stabilität zeigten keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Spielbelastung.

Weder Laborparameter, noch Reaktivkraft oder posturale Stabilität scheinen in der Lage zu sein, die aus der Spielbelastung resultierende Ermüdung zuverlässig und genau abzubilden. Gewisse Zusammenhänge sind zwar erkennbar, eine genaue Validierung sollte jedoch erfolgen. Auch im Lichte dieser Ergebnisse findet seit Juni 2021 ein engmaschiges (mindestens zweimal pro Woche) Monitoring der CK-Werte innerhalb des Drittliga-Teams des HFC statt. Dies ist kombiniert mit der Erfassung der Spieldaten (z. B. Laufdistanz, Sprints, Beschleunigungen), um einerseits die Laufleistung (Belastung) der Spieler objektiv beurteilen sowie das Training individuell steuern zu können.

7 Literaturverzeichnis

Aaronson LS, Teel CS, Cassmeyer V, Neuberger GB, Pallikkathayil L, Pierce J, Press AN, Williams PD, Wingate A (1999) Defining and measuring fatigue. *Image J Nurs Sch* 31:45–50.

Alashti M, Shirvani H, Rad R, Ordeghan A (2020) Effects of different small-sided games on blood lactate and GH/IGF-1 axis responses in young soccer players. *Ger J Exerc Sport Res* 51:86–93.

Álvarez-Nava F, Lanes R (2017) GH/IGF-1 signaling and current knowledge of epigenetics; A review and considerations on possible therapeutic options. *Int J Mol Sci* 18:1–13.

American Board of Internal Medicine (2021): ABIM Laboratory Reference Ranges. Online unter: <https://www.abim.org/Media/bfijryql/laboratory-reference-ranges.pdf>. Abgerufen am 18.09.2021.

Andelković M, Baralić I, Dordević B, Stevuljević JK, Radivojević N, Dikić N, Škodrić SR, Stojković M (2015) Hematological and biochemical parameters in elite soccer players during a competitive half season. *J. Med Biochem* 34:460–466.

Andersson H, Raastad T, Nilsson J, Paulsen G, Garthe I, Kadi F (2008) Neuromuscular fatigue and recovery in elite female soccer: Effects of active recovery. *Med Sci Sports Exerc* 40:372–380.

Andrade R, Wik EH, Rebelo-Marques A, Blanch P, Whiteley R, Espregueira-Mendes J, Gabbett TJ (2020) Is the acute:chronic workload ratio (ACWR) associated with risk of time-loss injury in professional team sports? A systematic review of methodology, variables and injury risk in practical situations. *Sports Med* 50:1613–1635.

Aughey RJ (2011) Applications of GPS technologies to field sports. *Int J Sports Physiol* 6:295–310.

Avni N, Avni I, Barenboim E, Azaria B, Zadok D, Kohen-Raz R, Morad Y (2006) Brief posturographic test as an indicator of fatigue. *Psychiatry Clin Neurosci* 60:340–346.

Bangsbo J, Mohr M, Krstrup P (2006) Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci* 24:665–674.

Becker M, Sperlich B, Zinner C, Achtzehn S (2020) Intra-individual and seasonal variation of selected biomarkers for internal load monitoring in U-19 soccer players. *Front Physiol* 11:1–13.

Bittencourt NFN, Meeuwisse WH, Mendonça LD, Nettel-Aguirre A, Ocarino JM, Fonseca ST (2016) Complex systems approach for sports injuries: Moving from risk factor identification to injury pattern recognition - Narrative review and new concept. *Br J Sports Med* 50:1309–1314.

Bougard C, Lepelley MC, Davenne D (2011) The influences of time-of-day and sleep deprivation on postural control. *Exp Brain Res* 209:109–115.

Bowen L, Gross AS, Gimpel M, Bruce-Low S, Li FX (2020) Spikes in acute:chronic workload ratio (ACWR) associated with a 5-7 times greater injury rate in English Premier League football players: A comprehensive 3-year study. *Br J Sports Med* 54:731–738.

Brancaccio P, Lippi G, Maffulli N (2010) Biochemical markers of muscular damage. *Clin Chem Lab Med* 48:757–767.

Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM (2007) Creatine kinase monitoring in sport medicine. *Br Med Bull* 81–82:209–230.

- Brink MS, Visscher C, Arends S, Zwerver J, Post WJ, Lemmink KAPM (2010) Monitoring stress and recovery: New insights for the prevention of injuries and illnesses in elite youth soccer players. *Br J Sports Med* 44:809–815.
- Brown S, Day S, Donnelly A (1999) Indirect evidence of human skeletal muscle damage and collagen breakdown after eccentric muscle actions. *J Sports Sci* 17:397–402.
- Brownstein CG, Dent JP, Parker P, Hicks KM, Howatson G, Goodall S, Thomas K (2017) Etiology and recovery of neuromuscular fatigue following competitive soccer match-play. *Front Physiol* 8:1–14.
- Butler A, Lord S, Rogers M, Fitzpatrick R (2008) Muscle weakness impairs the proprioceptive control of human standing. *Brain Res* 1242:244–251.
- Callegari GA, Novaes JS, Neto GR, Dias I, Garrido ND, Dani C (2017) Creatine kinase and lactate dehydrogenase responses after different resistance and aerobic exercise protocols. *J Hum Kinet* 58:65–72.
- Cannon JG, Orencole SF, Fielding RA, Meydani M, Meydani SN, Fiatarone MA, Blumberg JB, Evans WJ (1990) Acute phase response in exercise: Interaction of age and vitamin E on neutrophils and muscle enzyme release. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 259:1215–1219.
- Chtara M, Rouissi M, Bragazzi NL, Owen AL, Haddad M, Chamari K (2018) Dynamic balance ability in young elite soccer players: implication of isometric strength. *J Sports Med Phys Fitness* 58:414–420.
- Clemente FM, Rabbani A, Conte D, Castillo D, Afonso J, Clark CCT, Nikolaidis PT, Rosemann T, Knechtle B (2019) Training/match external load ratios in professional soccer players: A full-season study. *Int J Environ Res Public Health* 16:1–11.
- Cohen J: *Statistical Power Analysis for the behavioral Sciences*. 2. Edition. Lawrence Erlbaum Associates, New York, 1982, pp. 20, 25-26, 79-81.
- Coppalle S, Rave G, Ben Abderrahman A, Ali A, Salhi I, Zouita S, Zouita A, Brughelli M, Granacher U, Zouhal H (2019) Relationship of pre-season training load with in-season biochemical markers, injuries and performance in professional soccer players. *Front Physiol* 10:1–11.
- Di Salvo V, Benito PJ, Calderón FJ, Di Salvo M, Pigozzi F (2008) Activity profile of elite goalkeepers during football match-play. *J Sports Med Phys Fitness* 48:443–446.
- Drew MK, Finch CF (2016) The relationship between training load and injury, illness and soreness: A systematic and literature review. *Sports Med* 46:861–883.
- Edelmann S: *Karate - von der Physiologie zur Technik: Sportwissenschaftliche Grundlagen, Technikklassifikation und Trainingshinweise*. 2. Aufl. Books on Demand, Norderstedt, 2008, S. 95-96.
- Eliakim E, Morgulev E, Lidor R, Meckel Y (2020) Estimation of injury costs: Financial damage of English Premier League teams' underachievement due to injuries. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 6:1–5.
- Enoka RM, Duchateau J (2008) Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. *J Physiol* 586:11–23.
- Enoka RM, Duchateau J (2016) Translating fatigue to human performance. *Med Sci Sports Exerc* 48:2228–2238.
- F-MARC (2015) *F-MARC - Football for health 20 years of F-MARC research and education 1994 - 2014*. Fifa:258.
- FIFA (2007) *FIFA big count 2006*. FIFA Communications Division, Information Services 31:1–12.

- Fitzpatrick JF, Akenhead R, Russell M, Hicks KM, Hayes PR (2019) Sensitivity and reproducibility of a fatigue response in elite youth football players. *Sci Med Footb* 3:214–220.
- Frystyk J (2010) Exercise and the growth hormone-insulin-like growth factor axis. *Med Sci Sports Exerc* 42:58–66.
- Gabbett TJ (2016) The training-injury prevention paradox: Should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med* 50:273–280.
- Gabbett TJ (2020) Debunking the myths about training load, injury and performance: empirical evidence, hot topics and recommendations for practitioners. *Br J Sports Med* 54:58–66.
- Gioftsidou A, Malliou P, Pafis G, Beneka A, Godolias G, Maganaris CN (2006) The effects of soccer training and timing of balance training on balance ability. *Eur J Appl Physiol* 96:659–664.
- Goktepe M, Gunay M, Bezci S, Bayram M, Ozkan A (2016) Correlations between different methods of vertical jump and static balance parameters in athletes. *Turk J Sports Med* 18:147.
- Hader K, Rumpf MC, Hertzog M, Kilduff LP, Girard O, Silva JR (2019) Monitoring the athlete match response: Can external load variables predict post-match acute and residual fatigue in soccer? A systematic review with meta-analysis. *Sports Med - Open* 5:1–19.
- Halsom SL (2014) Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. *Sports Med* 44:139–147.
- Hammami MA, Ben Abderrahman A, Rhibi F, Nebigh A, Coppalle S, Ravé G, Tabka Z, Zouhal H (2018) Somatotype hormone levels and physical fitness in elite young soccer players over a two-year monitoring period. *J Sports Sci Med* 17:455–464.
- Hasani-Ranjbar S, Far ES, Heshmat R, Rajabi H, Kosari H (2012) Time course responses of serum GH, insulin, IGF-1, IGFBP1, and IGFBP3 concentrations after heavy resistance exercise in trained and untrained men. *Endocrine* 41:144–151.
- Henke T, Gläser H, Heck H: Sportverletzungen in Deutschland: Basisdaten, Epidemiologie, Prävention, Risikosportarten, Ausblick. In: Alt W, Schaff P, Schumann H (Hrsg): *Neue Wege zur Unfallverhütung im Sport*. Sport und Buch Strauß, Köln, 2000, S. 139–165.
- Henke T, Schulz D, Luig P (2014) Sportunfälle im Vereinssport in Deutschland. Aspekte der Epidemiologie und Prävention. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 57:628–637.
- Henry T, Evans K, Snodgrass SJ, Miller A, Callister R (2016) Risk factors for noncontact ankle injuries in amateur male soccer players: A prospective cohort study. *Clin J Sport Med* 26:251–258.
- Hottenrott K, Neumann G (2010) Ist das Superkompensationsmodell noch aktuell? *Leistungssport* 40:13–19.
- Hulin BT, Gabbett TJ, Blanch P, Chapman P, Bailey D, Orchard JW (2014) Spikes in acute workload are associated with increased injury risk in elite cricket fast bowlers. *Br J Sports Med* 48:708–712.
- Ispirlidis I, Fatouros IG, Chatzinikolaou A, Jamurtas AZ, Nikolaidis MG, Michailidis I, Douroudos I, Margonis K, Taxildaris K (2008) Time-course of changes in inflammatory and performance responses following a soccer game. *Med Sci Sports Exerc* 40:432.

- Jakowlew N (1976) Erweiterung der Regulationsbereiche des Stoffwechsels bei Anpassung an verstärkte Muskeltätigkeit. *Dtsch Z Sportmed* 16:66–70.
- Jallai T, Erelina J, Kums T, Aibast H, Gapeyeva H, Pääsuke M (2012) Postural control and vertical jumping performance in adolescent and adult male basketball players. *Acta Kinesiol Univ Tartu* 17:89–98.
- Junge A, Lamprecht M, Stamm H, Hasler H, Bizzini M, Tschopp M, Reuter H, Wyss H, Chilvers C, Dvorak J (2011) Countrywide campaign to prevent soccer injuries in Swiss amateur players. *Am J Sports Med* 39:57–63.
- Kasapis C, Thompson PD (2005) The effects of physical activity on serum C-reactive protein and inflammatory markers: A systematic review. *J Am Coll Cardiol* 45:1563–1569.
- Kellmann M (2018) Erholung ist mehr als nichtstun! *Dtsch Z Sportmed* 69:29–30.
- Kobayashi Y, Takeuchi T, Hosoi T, Yoshizaki H, Loeppky J (2006) Effect of a marathon run on serum lipoproteins, creatine kinase, and lactate dehydrogenase in recreational runners. *Res Q Exerc Sport* 76:450–455.
- Kraemer WJ, Aguilera BA, Terada M, Newton RU, Lynch JM, Rosendaal G, McBride JM, Gordon SE, Hakkinen K (1995) Responses of IGF-I to endogenous increases in growth hormone after heavy- resistance exercise. *J Appl Physiol* 79:1310–1315.
- Lazarim FL, Antunes-Neto JMF, da Silva FOC, Nunes LAS, Bassini-Cameron A, Cameron L-C, Alves AA, Brenzikofer R, de Macedo DV (2009) The upper values of plasma creatine kinase of professional soccer players during the Brazilian National Championship. *J Sports Sci Med* 12:85–90.
- Lee EC, Fragala MS, Kavouras SA, Queen RM, Pryor JL, Casa DJ (2017) Biomarkers in sports and exercise. *J Strength Cond Res.* 31:2920–2937.
- Leonhart R (2004) Effektgrößenberechnung bei Interventionsstudien TT - Estimating Effect Sizes in Clinical Trials. *Rehabilitation (Stuttg)* 43:241–246.
- Lepers R, Bigard AX, Diard JP, Gouteyron JF, Guezennec CY (1997) Posture control after prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol* 76:55–61.
- Luttmann A, Jäger M (2013) Physiologische Aspekte der Muskelermüdung bei beruflichen Tätigkeiten. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergon* 63:260–264.
- Magalhães J, Rebelo A, Oliveira E, Silva JR, Marques F, Ascensão A (2010) Impact of Loughborough Intermittent Shuttle Test versus soccer match on physiological, biochemical and neuromuscular parameters. *Eur J Appl Physiol* 108:39–48.
- Maier T, Gross M, Trösch S, Steiner T, Müller B, Bourban P, Schärer C, Hübner K, Wehrli J, Tschopp M, Wilhelm M, Clenin GE, Züst P, Seidel R (2016) Manual Leistungsdiagnostik. *Swiss Olympic* 1–96.
- Malone S, Roe M, Doran DA, Gabbett TJ, Collins KD (2017a) Protection against spikes in workload with aerobic fitness and playing experience: The role of the acute:chronic workload ratio on injury risk in elite gaelic football. *Int J Sports Physiol Perform* 12:393–401.
- Malone S, Owen A, Newton M, Mendes B, Collins KD, Gabbett TJ (2017b) The acute:chronic workload ratio in relation to injury risk in professional soccer. *J Sci Med Sport* 20:561–565.
- Maxwell JH, Bloor CM (1981) Effects of conditioning on exertional rhabdomyolysis and serum creatine kinase after severe exercise. *Enzyme* 26:177–181.

- McHugh MP, Clifford T, Abbott W, Kwiecien SY, Kremenec IJ, DeVita JJ, Howatson G (2019) Countermovement jump recovery in professional soccer players using an inertial sensor. *Int J Sports Physiol Perform* 14:9–15.
- Meister S, Faude O, Ammann T, Schnittker R, Meyer T (2013) Indicators for high physical strain and overload in elite football players. *Scand J Med Sci Sports* 23:156–163.
- Mejri S, Bchir F, Rayana MC Ben, Hamida J Ben, Slama C Ben (2005) Effect of training on GH and IGF-1 responses to a submaximal exercise in football players. *Eur J Appl Physiol* 95:496–503.
- Meyer T, Kellmann M, Ferrauti A, Pfeiffer M, Faude O (2013) Die Messung von Erholtheit und Regenerationsbedarf im Fußball. *Dtsch Z Sportmed* 64:28–34.
- Meyer T, Meister S (2011) Routine blood parameters in elite soccer players. *Int J Sports Med* 32:875–881.
- Miao P, Sheng S, Sun X, Liu J, Huang G (2013) Lactate dehydrogenase a in cancer: A promising target for diagnosis and therapy. *IUBMB Life* 65:904–910.
- Mougios V (2007) Reference intervals for serum creatine kinase in athletes. *Br J Sports Med* 41:674–678.
- Ndlec 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 Med* 42:997–1015.
- Neumann G, Berbalk A: Umstellung und Anpassung des Organismus - grundlegende Voraussetzungen der sportlichen Leistungsfähigkeit. In: Bernett P, Jeschke, D (Hrsg.): Sport und Medizin pro und contra. Zuckschwerdt, München, 1991, S. 415–419.
- Nindl BC, Kraemer WJ, Marx JO, Arciero PJ, Dohi K, Kellogg MD, Loomis GA (2001) Overnight responses of the circulating IGF-I system after acute, heavy-resistance exercise. *J Appl Physiol* 90:1319–1326.
- Nosaka K, Clarkson P, Apple F (1992) Time course of serum protein changes after strenuous exercise of the forearm flexors. *J Lab Clin Med* 119(2):183–188.
- Nowakowska A, Kostrzewa-Nowak D, Buryta R, Nowak R (2019) Blood biomarkers of recovery efficiency in soccer players. *Int J Environ Res Public Health* 16(18):3279.
- Overgaard K, Højfeldt G (2010) Effects of acidification and increased extracellular potassium on dynamic muscle contractions in isolated rat muscles. *J Physiol* 588:5065–5076.
- Paillard T (2012) Effects of general and local fatigue on postural control: A review. *Neurosci Biobehav Rev* 36:162–176.
- Palacios G, Pedrero-Chamizo R, Palacios N, Maroto-Sánchez B, Aznar S, González-Gross M (2015) Biomarkers of physical activity and exercise. *Nutr Hosp* 31:237–244.
- Pankow J, Folsom A, Cushman M, Borecki I, Hopkins P, Eckfeldt J, Tracy R (2001) Familial and genetic determinants of systemic markers of inflammation: the NHLBI Family Heart Study. *Atherosclerosis* 154:681–689.
- Pau M, Ibba G, Attene G (2014) Fatigue-induced balance impairment in young soccer players. *J Athl Train* 49:454–461.
- Pyne DB, Martin DT: Fatigue-insights from individual and team sports. In: Marino FE (ed): Regulation of fatigue in exercise. Nova Publisher, New York, 2011, pp. 177–85.
- Raschka C, Nitsche L: Praktische Sportmedizin. 1. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2016, S. 45-97; 261-265.

- Russell M, Northeast J, Atkinson G, Shearer DA, Sparkes W, Cook CJ, Kilduff LP (2015) Between-match variability of peak power output and creatine kinase responses to soccer match-play. *J Strength Cond Res* 29:2079–2085.
- Sahlin K (1992) Metabolic factors in fatigue. *Sports Med* 13:99–107.
- Schwesig R, Lauenroth A, Müller A, Becker S, Hottenrott K (2006) Parametrisierung posturaler Subsysteme mit Posturografie. *Man Medizin* 44:376–384.
- Schwesig R, Kluttig A, Leuchte S, Becker S, Schmidt H, Esperer HD (2009) Der Einfluss unterschiedlicher Sportarten auf die Haltungsregulation. *Sportverletz Sportschaden* 23:148–154.
- Schwesig R, Becker S, Fischer D (2014) Intraobserver reliability of posturography in healthy subjects. *Somatosens Mot Res* 31:16–22.
- Seiwerth I, Jonen J, Rahne T, Lauenroth A, Hullar TE, Plontke SK, Schwesig R (2020) Postural regulation and stability with acoustic input in normal hearing subjects. German version. *HNO* 68:344–351.
- Siahkouhian M, Esmailzadeh S (2011) Comparisons of serum C-reactive protein in young soccer players and non-athletes. *Biol Sport* 28:255–258.
- Silva JR, Rebelo A, Marques F, Pereira L, Seabra A, Ascensão A, Magalhães J (2013) Biochemical impact of soccer: an analysis of hormonal, muscle damage, and redox markers during the season. *Appl Physiol Nutr Metab* 39:432–438.
- Soligard T, Schwelnus M, Alonso JM, Bahr R, Clarsen B, Dijkstra HP, Gabbett T, Gleeson M, Hägglund M, Hutchinson MR, Janse Van Rensburg C, Khan KM, Meeusen R, Orchard JW, Pluim BM, Raftery M, Budgett R, Engebretsen L (2016) How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury. *Br J Sports Med* 50:1030–1041.
- Son C-G (2019) Differential diagnosis between “chronic fatigue” and “chronic fatigue syndrome”. *Integr Med Res* 8:89–91.
- Souglis A, Bogdanis GC, Chryssanthopoulos C, Apostolidis N, Geladas ND (2018) Time course of oxidative stress, inflammation, and muscle damage markers for 5 days after a soccer match: Effects of sex and playing position. *J Strength Cond Res* 32:2045–2054.
- Sproston NR, Ashworth JJ (2018) Role of C-reactive protein at sites of inflammation and infection. *Front Immunol* 9:1–11.
- Stockwell C (1981) Posturography. *Otolaryngol. Head Neck Surg* 89:333–335.
- Stubbe JH, Van Beijsterveldt AMMC, Van Der Knaap S, Stege J, Verhagen EA, Van Mechelen W, Backx FJG (2015) Injuries in professional male soccer players in the Netherlands: A prospective cohort study. *J Athl Train* 50:211–216.
- The American Heritage® Medical Dictionary (2007): Exercise physiology. Online unter: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/exercise+physiology>. Abgerufen am 15.01.2021.
- Tiesinga LJ, Dassen TW, Halfens RJ (1996) Fatigue: a summary of the definitions, dimensions, and indicators. *Nurs Diagn* 7:51–62.
- Twist C, Highton J (2012) Monitoring Fatigue and Recovery in Rugby League Players. *Int J Sports Physiol Perform* 8:467–474.
- Wan JJ, Qin Z, Wang PY, Sun Y, Liu X (2017) Muscle fatigue: General understanding and treatment. *Exp Mol Med* 49:e384-11.
- Willimczik K, Höner O: Statistik im Sport : Grundlagen - Verfahren - Anwendungen. 3. Aufl. Czwalina, Hamburg, 1997, S. 259.

Wilson JM, Kim JS, Lee SR, Rathmacher JA, Dalmau B, Kingsley JD, Koch H, Manninen AH, Saadat R, Panton LB (2009) Acute and timing effects of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB) on indirect markers of skeletal muscle damage. *Nutr Metab* 6:1–8.

Windt J, Zumbo BD, Sporer B, Macdonald K, Gabbett TJ (2017) Why do workload spikes cause injuries, and which athletes are at higher risk? Mediators and moderators in workload-injury investigations. *Br J Sports Med* 51:993–994.

Zemková E, Viitasalo J, Hannola H, Blomqvist M, Kontinen N, Mononen K (2007) The effect of maximal exercise on static and dynamic balance in athletes and non-athletes. *Med Sport* 11:70–77.

8 Thesen

1. Die Kreatinkinase zeigte unter den Beanspruchungsparametern den deutlichsten Anstieg im Saisonverlauf gegenüber dem Ausgangsniveau ($d_{MZP1-2} = 1,19$ bzw. $d_{MZP1-3} = 1,23$).
2. Beim ST ($|d| \leq 0,41$) sowie den Drop Jumps rechts ($|d| \leq 0,39$) und links ($|d| \leq 0,31$) waren jeweils geringe Veränderungen über den Saisonverlauf erkennbar.
3. Es konnten keine wesentlichen Veränderungen des WDI ($|d| \leq 0,06$) sowie der Drop Jumps beidbeinig ($|d| \leq 0,05$) über den Saisonverlauf festgestellt werden.
4. Die größten Korrelationen bestanden zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% ($r = 0,783$; MZP 2) sowie den DJ bb% ($r = 0,706$; MZP 3).
5. Relevante positive Korrelationen mit der Intervallspielzeit bestanden für die Parameter CRP% ($r = 0,645$; MZP 2) und LDH% ($r = 0,589$; MZP 2) sowie die DJ bb% ($r = 0,544$; MZP 3) und DJ li% ($r = 0,602$; MZP 3).
6. Keine der relevanten Korrelationen zwischen Spielzeit und leistungsphysiologischen Parametern blieben über zwei MZP bestehen.
7. Keiner der untersuchten Parameter konnte die Spielbelastung zuverlässig widerspiegeln.
8. Ein Zusammenhang bestand zwischen einer verbesserten Sprungkraft und einer posturalen Instabilität ($0,411 \leq r \leq 0,744$).

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1a–c:	Relatives Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von Spielerfahrung, Grundlagenausdauer und Relativkraft der unteren Extremitäten.....	3
Abb. 2:	Relative Verletzungsinzidenz von schweren Verletzungen bei männlichen Fußballspielern unterschiedlicher Altersgruppen.....	4
Abb. 3:	Ursachen von Kontakt- und Nicht-Kontaktverletzungen und deren Häufigkeiten bei Fußballspielerinnen	4
Abb. 4:	Verletzungsrisiko in Abhängigkeit vom <i>Acute: Chronic Workload Ratio</i> ..	5
Abb. 5:	Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von chronischer Belastung bei Cricket-Werfern.....	6
Abb. 6:	Zusammenhang zwischen akuter Belastung (<i>Workload Spike</i>), Belastbarkeit (<i>Aerobic Fitness</i>) und Beanspruchung (<i>Injury</i>).....	7
Abb. 7:	Superkompensationsmodell nach Jakowlew (1976).....	11
Abb. 8:	Überblick über die Untersuchungsplanung.....	21
Abb. 9:	Spiele (dargestellt als Pfeile) der U17 B-Jugend Fußballmannschaft des HFC zwischen dem 1. und dem 3. MZP	21
Abb. 10a–b:	Kraftmessplatten des IBS	23
Abb. 11:	Umwandlung der Kraft-Zeit-Signale in Spektrogramme (Amplituden und Frequenzen) mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT).....	24
Abb. 12a–c:	Durchführung der Drop Jumps	26
Abb. 13a–b:	Kumulative Spielbelastung zwischen zwei MZP bzw. über die letzten acht Tage vor einem MZP	30
Abb. 14a–b:	Fußballspiele der letzten acht Tage vor einem MZP.....	31
Abb. 15a–d:	Laborwertmessungen von CK, CRP, LDH und IGF-1 zu den MZP 1 bis 3	33
Abb. 16:	Korrelation zwischen Intervallspielzeit und CRP% zum MZP 2.....	35
Abb. 17:	Korrelation zwischen Intervallspielzeit und LDH% zum MZP 2.....	35
Abb. 18:	Korrelation zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% zum MZP 2	35
Abb. 19a–b:	Verlauf der posturographischen Parameter WDI und ST.....	38
Abb. 20a–c:	Sprunghöhen der Drop Jumps beidbeinig, rechtsbeinig und linksbeinig über den Saisonverlauf	40
Abb. 21:	Korrelation zwischen Intervallspielzeit und DJ bb% zum MZP 3.....	42
Abb. 22:	Korrelation zwischen 8-Tage-Spielzeit und DJ bb% zum MZP 3	43
Abb. 23:	Korrelation zwischen Intervallspielzeit und DJ li% zum MZP 3	44
Abb. 24:	CK-Werte der einzelnen Spieler über den Saisonverlauf.....	48
Abb. 25:	CRP-Konzentrationen der einzelnen Spieler im Saisonverlauf	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht aller Verletzungen der niederländischen Profifußballer im Jahr 2015	2
Tab. 2:	Beispiele für etablierte Belastungs- und Beanspruchungsparameter	9
Tab. 3:	Vierstufenmodell nach Neumann und Berbalk (1991)	11
Tab. 4:	Übersicht häufig verwendeter leistungsdiagnostischer Methoden in der Sportmedizin.....	13
Tab. 5:	Übersicht häufig angewandter Parameter zur Ermüdungs- bzw. Erholtheitsdiagnostik im Fußball	14
Tab. 6:	Referenzwerte ausgewählter Laborparameter	15
Tab. 7:	Abfolge der durchgeführten Untersuchungsmethoden und deren Parameter.....	20
Tab. 8:	Frequenzbereiche nach FFT und primär geforderte posturale Subsysteme	24
Tab. 9:	Parameter des motorischen Outputs (Produktparameter)	25
Tab. 10:	Testpositionen beim IBS (Schwesig et al., 2014).....	25
Tab. 11:	Chronologische Abfolge der Drop Jumps	26
Tab. 12:	Anzahl aller erhobenen Datensätze bei n = 21 unter Einbeziehung des 4. MZP	27
Tab. 13:	Anzahl aller verwendeten Datensätze nach Ausschluss des 4. MZP und von Spielern mit fehlenden Datensätzen	27
Tab. 14:	Ergebnisse der zum MZP 1 erhobenen Laborparameter Vit. B12, Vit. D und Ferritin mit Angabe von Referenzwerten	32
Tab. 15:	Effektgrößen und Signifikanzen der Post-hoc-Tests	34
Tab. 16:	Korrelationen zwischen DJ und ST (PC)	46
Tab. 17:	Exemplarischer Vergleich der CK-Werte [U/l] und Spielzeiten [min] zweier Spieler (A und B) zum MZP 3.....	48
Tab. 18:	Spielzeiten [min] und CRP-Werte [mg/dl] der Spieler A und B.....	52

Anlage 1: Trainingstagebuch

Tagesansicht – Körperliche Beanspruchung											Trainingswoche: 5 (TW)				Name: [REDACTED]				
1. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum: 8.8.2017				Schlafdauer: 7h				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
2. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum: 8.8.2017				Schlafdauer: 7h				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
3. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum: 9.8.2017				Schlafdauer: 6h				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
4. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum: 10.8.2017				Schlafdauer: 5h				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
5. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum: 11.8.2017				Schlafdauer: 7h				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
6. TE					Vormittag			Nachmittag			Datum:				Schlafdauer:				
	sehr sehr leicht		sehr leicht							relativ leicht		etwas anstrengend		anstrengend		sehr anstrengend		sehr sehr anstrengend	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
Beanspruchung Fahrt					Hinfahrt: 30min (Dauer)				Rückfahrt: (Dauer)				Datum: 11.8.2017						
Hin	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
Rück	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
Beanspruchung Spiel					Spieldauer: 30min (1.HZ)				Spieldauer: (2.HZ)				Datum: 11.8.2017						
1.HZ	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
2.HZ	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				

Anlage 2: Fragebogen Akutmaß Erholung und Beanspruchung



Name/Code	[REDACTED]	Datum/Uhrzeit	[REDACTED]
-----------	------------	---------------	------------

Akutmaß Erholung und Beanspruchung

Im Folgenden befindet sich eine Liste mit Adjektiven, die den Zustand von Erholung oder Beanspruchung beschreiben. Nimm bitte für jedes Adjektiv eine Einschätzung vor und setze ein Kreuz an die Stelle, die für Deinen jetzigen Zustand am ehesten zutrifft.

Im Augenblick fühle ich mich...	trifft gar nicht zu	0	1	2	3	4	5	trifft voll zu
1 erholt	0						X	6
2 muskulär überanstrengt	0	X						6
3 zufrieden	0		1	2	3	X		6
4 unmotiviert	0		X	2	3	4	5	6
5 aufmerksam	0		1	2	3	4	X	6
6 bedrückt	X		1	2	3	4	5	6
7 kraftvoll	0		1	2	3	X		6
8 geschäftig	0	X		2	3	4	5	6
9 ausgeruht	0		1	2	3	4	X	6
10 muskulär ermüdet	0	X		2	3	4	5	6
11 ausgeglichen	0		1	2	3	4	X	6
12 antriebslos	0	X		2	3	4	5	6
13 aufnahmefähig	0		1	2	3	4	5	X
14 gestresst	X		1	2	3	4	5	6
15 leistungsfähig	0		1	2	3	X		6
16 entkräftet	0	X		2	3	4	5	6
17 muskulär locker	0		1	2	3	X		6
18 lustlos	0	X		2	3	4	5	6
19 gut gelaunt	0		1	2	3	4	X	6
20 genervt	X		1	2	3	4	5	6
21 mental hellwach	0		1	2	3	4	X	6
22 muskulär übersäuert	X		1	2	3	4	5	6
23 energiegeladener	0		1	2	3	4	X	6
24 überlastet	0	X		2	3	4	5	6
25 körperlich entspannt	0		1	2	3	X		6
26 muskulär verhärtet	0	X		2	3	4	5	6
27 alles im Griff habend	0		1	2	3	4	X	6
28 energielos	0	X		2	3	4	5	6
29 konzentriert	0		1	2	3	4	X	6
30 leicht reizbar	X		1	2	3	X		6
31 voller Power	0		1	2	3	4	5	6
32 körperlich platt	0	X		2	3	4	5	6

Anlage 3: Kurzsкала Erholung und Beanspruchung (KEB)

Kurzskala Erholung und Beanspruchung (KEB)

Erholung

Körperliche Leistungsfähigkeit

zum Beispiel kraftvoll, leistungsfähig, energiegeladen, voller Power



Mentale Leistungsfähigkeit

zum Beispiel aufmerksam, aufnahmefähig, konzentriert, mental hellwach



Emotionale Ausgeglichenheit

zum Beispiel zufrieden, ausgeglichen, gut gelaunt, alles im Griff habend



Allgemeiner Erholungszustand

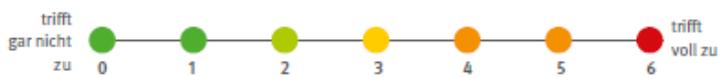
zum Beispiel erholt, ausgeruht, muskulär locker, körperlich entspannt



Beanspruchung

Muskuläre Beanspruchung

zum Beispiel muskulär überanstrengt, muskulär ermüdet, muskulär übersäuert, muskulär verhärtet



Aktivierungsmangel

zum Beispiel unmotiviert, antriebslos, lustlos, energieelos



Emotionale Unausgeglichenheit

zum Beispiel bedrückt, gestresst, genervt, leicht reizbar



Allgemeiner Beanspruchungszustand

zum Beispiel geschafft, entkräftet, überlastet, körperlich platt



Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

„Leistungsphysiologische Parameter einer U17 Fußballmannschaft im Saisonverlauf“

unter der Betreuung von Univ.- Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank und Herrn apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig selbst angefertigt habe.

Die Ergebnisse wurden bisher weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Weise publiziert noch anderen Prüfungsbehörden vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift

Erklärung über frühere Promotionsversuche

Ich erkläre hiermit, dass ich dato keine andere Promotion verfasst und eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen Personen, die mich maßgeblich bei der Anfertigung dieser Arbeit begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig, der mich über die gesamte Zeit mit seinem unglaublichen Engagement betreut und unterstützt hat. Vielen Dank dafür!

Auch bin ich Herrn Udo Bauer außerordentlich dankbar, durch dessen großen Einsatz ich überhaupt die Möglichkeit dieser Dissertation bekommen habe. Vielen Dank, Udo!

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. med. Thomas Bartels und dem gesamten Team der Sportklinik Halle sowie Herrn Dr. Eduard Kurz, Herrn Stefan Pröger und Herrn Dr. Stefan Schulze bedanken, ohne die diese Studie nicht möglich gewesen wäre.

Darüber hinaus möchte ich die B-Jugend-Spieler des Halleschen FC lobend erwähnen, die trotz ihres hohen Trainings- und Spielumfangs an dieser Studie teilgenommen haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie, die mich in jeder Lebenslage unterstützt und mir hilft, jedes Hindernis zu überwinden und mich persönlich und beruflich weiterzuentwickeln. Vielen lieben Dank!