



BEWERBUNG FÜR DEN PRÄVENTIONSPREIS 2022 - VBG NEXT

**Return to Soccer - sportmedizinisches und
sportwissenschaftliches Konzept zur Verbesserung
der Diagnostik von Ermüdung und Erholtheit zum
Zwecke der Verringerung der Verletzungshäufigkeit
und Verbesserung der Trainingssteuerung**

Hallescher Fußballclub e.V.

Kantstraße 2
06110 Halle (Saale)

vertreten durch:

Dr. med. Thomas Bartels (M-Arzt - Team-Arzt)

Sportklinik Halle
Dr. med. Thomas Bartels
Weidenplan 16
06108 Halle

In Kooperation mit der:

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Medizinische Fakultät
Department Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
Labor für Experimentelle Orthopädie & Sportmedizin
apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle



GLIEDERUNG

Einleitung.....	3
1 HFC – Trainings- und Präventionskonzept	7
2 Spielmonitoring mittels Polar Team Pro System.....	13
3 Längsschnittliche CK-Messungen im Kontext eines komplexen Belastungs-Beanspruchungsmonitorings.....	17
4 Ausdauerleistungsdiagnostik in Liga 3 – Aufbau und Etablierung einer Referenzdatenbank.....	22
5 Fußballspezifische Leistungsdiagnostik - vergleichende Analyse Ausdauerleistungsdiagnostik und small sided games.....	27
6 Saisonbegleitende Evaluierung leistungsphysiologischer Parameter in der U17.....	33
7 Einsatz des dEMG im Rahmen der RTC-Testung vorderes Kreuzbandes.....	40
8 Entwicklung eines komplexen biomechanischen Messplatzes für die VKB-RTC-Testung.....	46
9 Verletzungsgeschehen HFC – Vorstellung primär- & sekundär präventiver Konzepte und Maßnahmen	52
10 Hüftabduktion – potentieller Indikator für das Verletzungsrisiko der unteren Extremität.....	57
Schlussbemerkung.....	61

Einleitung

Der Hallesche FC ist ein ostdeutscher Traditionsverein (Gründung: 1966), der seit nunmehr 9 Jahren in der 3. Liga spielt. Die sportmedizinische und orthopädische Betreuung wird seit 18 Jahren durch die Sportklinik Halle (Dr. med. Thomas Bartels, M-Arzt des HFC) sichergestellt. Auf Grund ihrer gezeigten Leistungen in der chirurgischen Versorgung von Verletzungen, verfügt die Sportklinik Halle im Profisport, über einen „Sondervertrag Hochleistungssport“ mit der VBG.

Die diesjährige Preiseinreichung für den Präventionspreis 2022 – VBG Next schließt in gewisser Weise an die erfolgreiche Teilnahme im Jahr 2018 an. Das damals vorgestellte Konzept *„Komplexes, sportmedizinisches und trainingswissenschaftliches Konzept zur Verbesserung der Trainingssteuerung und Verringerung der Verletzungshäufigkeit unter besonderer Berücksichtigung der vorderen Kreuzbandruptur“* wurde zwischenzeitlich weiterentwickelt und signifikant ergänzt (Abb. 1). Bezugnehmend auf die diesjährige Ausschreibung, wonach „Sie das Rad nicht neu erfinden müssen.“, bündelt die hier vorgestellte Arbeit bekannte Inhalte (z. B. CK-Diagnostik, Laktatleistungsdiagnostik) mit innovativen Ideen (z. B. dEMG, VKB-RTC-Testung). Sie stellt überdies inhaltliche Bezüge zwischen unterschiedlichen Parametern her (siehe Kapitel 3), um das Belastungs-Belastbarkeits-Beanspruchungskonzept suffizienter auflösen zu können.

Leitmotiv für unsere Tätigkeit im Leistungssport ist die systematische Anwendung und wissenschaftlich fundierte Analyse von diagnostischen und/oder interventionellen Maßnahmen (Ziele: Verletzungsprävention & Leistungssteigerung). Beispielhaft seien an dieser Stelle die o.g. CK-Diagnostik, Laktatleistungsdiagnostik genannt, die per se nicht neuwertig sind, aber langfristig und kontinuierlich angewendet inzwischen individuelle und positionsspezifische (Laktatleistungsdiagnostik) Referenzwerte liefern (Abb. 1).

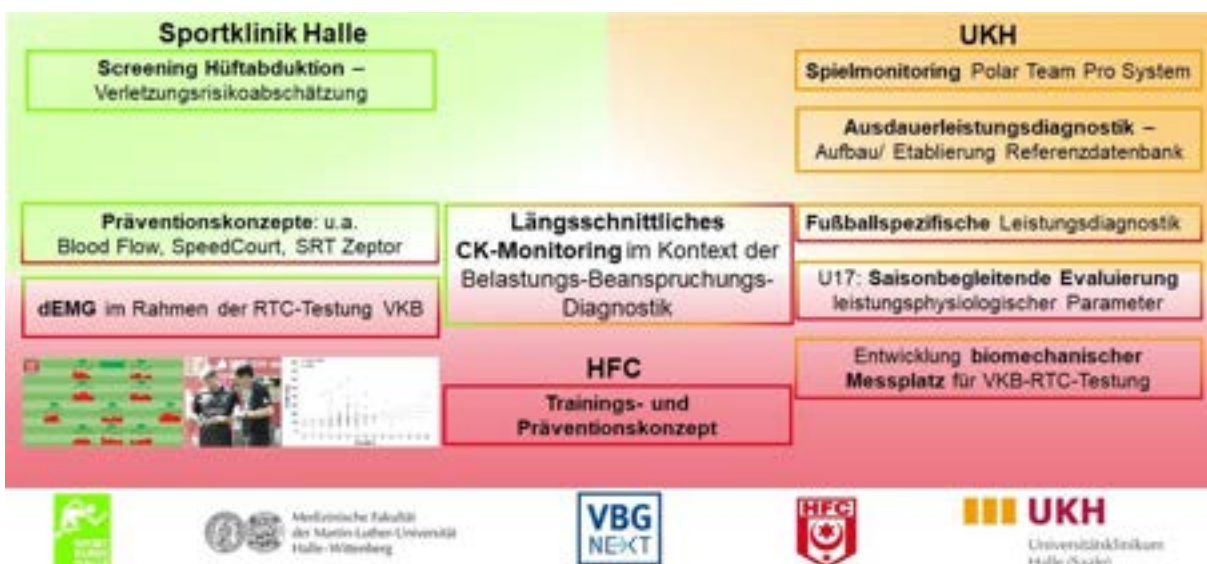


Abb. 1: Diagnostisches und präventives Gesamtkonzept des HFC zum Zwecke der Verletzungsreduktion und Leistungssteigerung

Insofern ist nicht nur der Inhalt entscheidend sondern mindestens ebenso der qualifizierte Umgang mit den erhobenen Daten. Dies beinhaltet die suffiziente statistische Analyse ebenso wie „das Lesen der Daten“ im Sinne einer praxis-

orientierten Interpretation (Formulierung von Trainingsplänen und –empfehlungen). Kombiniert mit neuen innovativen Ansätzen (z. B. dEMG, stochastische Resonanztherapie, SpeedCourt, Blood flow restriction) oder bekannten Tests im neuen Anwendungsfeld (z. B. Hüftabduktion) ergibt sich integrativ ein spannendes und leistungsfähiges Gesamtkonzept (Abb. 1).

Inhaltlich basiert dieses auf dem o.g. und etabliertem Belastung-Belastbarkeits-Beanspruchungskonzept sowie zahlreichen aktuellen Evidenzen speziell im Bereich Teamsport/Fußball (F-MARC 2015; Stubbe et al. 2015; Malone et al. 2017a,b; Andrade et al. 2020; Bowen et al. 2020; Gabbett et al. 2016, 2020). In diesen Arbeiten wird die Beziehung zwischen Belastung und Verletzungsrisiko 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. 2).

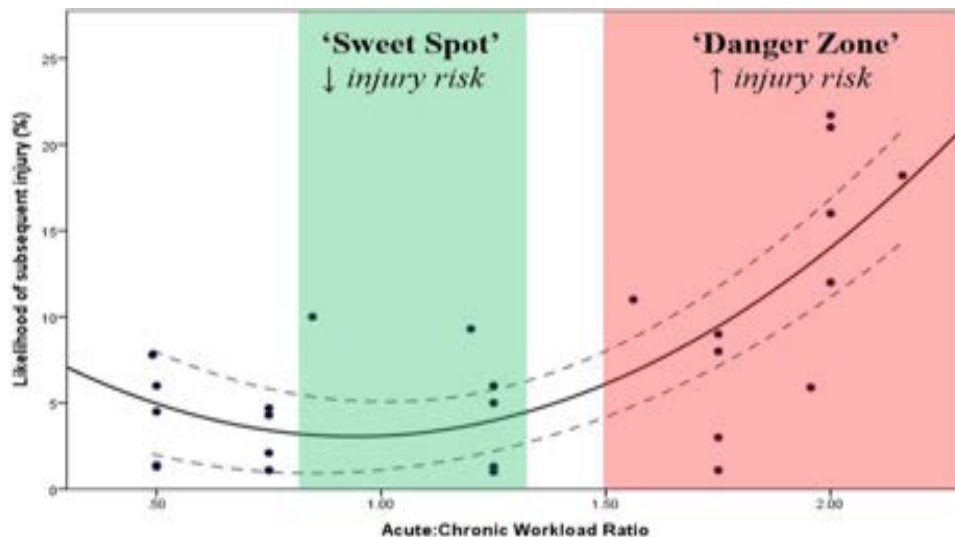


Abb. 2: Verletzungsrisiko in Abhängigkeit vom Acute:Chronic Workload Ratio. Der sweet spot (grüne Fläche) stellt den Bereich des niedrigsten, die danger zone (rote Fläche) den Bereich des höchsten Verletzungsrisikos in Abhängigkeit vom ACWR dar (Gabbett 2016, S. 6).

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).

Eben diese richtige Dosierung von Belastung und Erholung, basierend auf einer validierten Diagnostik von Ermüdung und Erholtheit, stellt nach wie vor eine der herausforderndsten Aufgaben in der Sportmedizin und Sportwissenschaft dar. Auch basierend auf den Erkenntnissen der Arbeitsgruppe um Tim Meyer (Regenerationsmanagement im Spitzensport, REGman – Ergebnisse und Handlungsempfehlungen) beschäftigt sich die hier vorgestellte Arbeit mit eben dieser Thematik. Gleichsam sei

an dieser Stelle darauf verwiesen, das aktuell ein multizentrisches (Sportklinik Halle, UKH, GAMPT mbH, NH DyeAGNOSTICS GmbH) und interdisziplinäres (Orthopädie, Sportwissenschaft, Sportmedizin, Biologie, Medizinische Physik und Biophysik) Forschungsprojek stattfindet (Thema: Entwicklung von Schnelltests für Rehabilitation und Sport zum Monitoring der Muskelrelaxation (MuskelSTRESS)), welches sich mit den unterschiedlichen Ebenen der Ermüdung (metabolisch, neuronal, muskulär etc.) und infolgedessen auch mit unterschiedlichen diagnostischen Ansätzen (z. B. Proteinbiomarkeranalyse, Ultraschalldiagnostik mit Anregeeinheit) beschäftigt (Abb. 3).

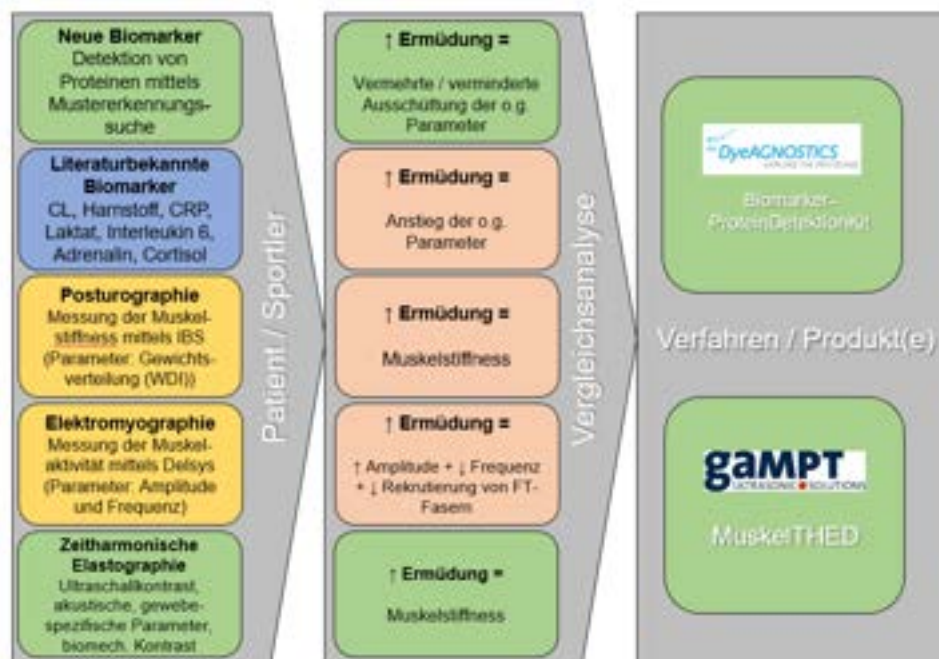


Abb. 3: Unterschiedliche diagnostische Ansätze zur Erfassung von Ermüdung und Erholtheit

Erkenntnisse aus diesem noch laufenden Projekt fließen teilweise (CK, Laktat, dEMG) in diese Arbeit ein. Vielmehr soll dieser kleine Exkurs verdeutlichen, dass wir uns der Komplexität und Mehrdimensionalität des Untersuchungsgegenstandes bewusst sind und uns mit dem aktuellen Erkenntnis- und Entwicklungsstand nicht zufrieden geben. Überdies versuchen wir die Leistungsdiagnostik im Fußball möglichst fußballspezifisch zu gestalten. Dies beinhaltet die Entwicklung und Validierung neuer Tests (Schwesig et al. 2013, 2016) sowie die sinnvolle Vernetzung vorhandene Inhalte (z. B. Laktatleistungsdiagnostik & small sided games) (Reinhardt et al. 2019, 2020a,b).

Abschließend verweisen wir auf die inzwischen fünfjährige Kooperation zwischen der Sportklinik Halle (Dr. Thomas Bartels) und dem Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Leitung: Prof. Dr. Karl-Stefan Delank) mit dem dort ansässigen Labor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin (Leitung: apl. Prof. Dr. René Schwesig).

Diese Kooperation dokumentiert sich in zahlreichen gemeinsamen wissenschaftlichen Publikationen (14 Peer Review Publikationen) sowie in der erfolgreichen Bearbeitung von Industrie- und VBG-Projekten („Querschnittliche klinische Untersuchung zur Beurteilung der Belastbarkeit des vorderen Kreuzbandes 6 Monate postoperativ zur Referenzdatenerhebung sowie Qualifizierung der Kreuzbanddiagnostik“ und „Return-



to-Competition Testmanual zur Beurteilung der Spielfähigkeit nach akuter lateraler Bandverletzung am Sprunggelenk“).

Von dieser erfolgreichen Zusammenarbeit hat auch der HFC in den letzten Jahren infrastrukturell und sportlich profitiert, was 2018 von der VBG mit dem Präventionspreis im Rahmen des Programms VBG_NEXT honoriert wurde.

Literatur

Andrade R., Wik E.H., Rebelo-Marques A., et al. (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.

Bowen L., Gross A.S., Gimpel M., et al. (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.

F-MARC (2015). F-MARC - Football for Health 20 years of F-MARC Research and Education 1994 - 2014. Fifa:258.

Gabbett T.J. (2016). The training-injury prevention paradox: Should athletes be training smarter and harder? *Br. J. Sports Med.*, 50, 273–280.

Gabbett T.J. (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.

Malone S., Roe M., Doran D.A., et al. (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., et al. (2017b). The acute:chronic workload ratio in relation to injury risk in professional soccer. *J. Sci. Med. Sport*, 20, 561–565.

Reinhardt L., Lauenroth A., Kurz E., et al. (2019). Enhanced sprint performance analysis in soccer: New insights from a GPS-based tracking system. *PLoS One*, 14, e0217782.

Reinhardt L., Schulze S., Kurz E., et al. (2020). Heart rate recovery in small-sided games is strongly related to v4 in soccer players. *Sports Med. Open*, 6, 43.

Reinhardt L., Schulze S., Schwesig R., et al. (2020). Physical match performance in sub-elite soccer players – introduction of a new index. *Int. J. Sports Med.*, 6, 43.

Schwesig R., Hartmann M., Leuchte S., et al. (2013). Validity of complex soccer-specific field test and a non-specific sprint test - Assessments for test and match performance. *Sportverl Sportschaden*, 27, 75-84.

Schwesig R., Miserius M., Hermassi S., et al. (2016). How valid is the performance diagnostic in soccer? *Sportverl Sportschaden*, 30, 26-30.

Stubbe J.H., Van Beijsterveldt A.M.M.C., Van Der Knaap S., et al. (2015). Injuries in professional male soccer players in the Netherlands: A prospective cohort study. *J. Athl. Train.*, 50, 211–216.



HFC – Trainings- und Präventionskonzept

Hintergrund

Eine unvollständige Regeneration myofibrillärer Strukturen und Stoffwechselfvorgänge vor dem nächsten Training erhöht bekanntermaßen das Risiko für Folgeverletzungen. Daher ist es für die Einhaltung von Trainingsplänen und für den Trainingserfolg wichtig, dass die Regeneration so effektiv und so kurz wie möglich ist (Buchwald-Werner et al. 2018).

Übertraining hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Trainings- / Wettkampfleistung und kann daher verheerende Auswirkungen auf die Karriere eines Athleten haben. Ein Übertrainings Syndrom (OTS) wird durch chronische Ungleichgewichte zwischen übungsbedingter Müdigkeit und ausreichender Ruhe nach dem Training verursacht (Cheng et al. 2020).

Belastungsinduzierte Muskelschäden führen zu verzögert auftretenden „Muskelkater“ (Clarkson et al. 1986) und Entzündungen (MacIntyre et al. 2001; Evans et al. 2002) sowie einer Beeinträchtigung der Kraft. Darüber hinaus können diese Symptome wiederum eine Rückkopplung an das Zentralnervensystem bewirken und zu einer weiteren Kraftbeeinträchtigung beitragen (Racinais et al. 2008; Gauche et al. 2009). Obwohl miteinander verbunden, wurde gezeigt, dass sich diese Symptome mit unterschiedlichen Zeitverläufen erholen, wobei über Kraftdefizite bis zu 4 (Martin et al. 2004) und 6 Tage (Hunter et al. 2012) nach dem Auftreten belastungsinduzierter Muskelschäden berichtet wird, während in denselben Studien festgestellt wurde, dass sich Muskelkater innerhalb von 3 Tagen regeneriert. Die Entstehung von belastungsinduzierten Muskelschäden wurde vielfältig beschrieben (Howatson und van Someren 2008), dennoch ist das Verständnis für die Erholung dieser Schäden vergleichsweise gering (Peake und Gandevia 2017).

In den letzten Jahren ist das athletische Anforderungsprofil im Fußball deutlich anspruchsvoller geworden (Bradley et al. 2016), da die Anzahl der Sprints und Aktionen in den hohen Geschwindigkeitsbereichen angestiegen ist (Barnes et al. 2014). Hohe Intensitäten benötigen ausreichend Ruhe, denn eine unvollständige Regeneration myofibrillärer Strukturen und Stoffwechselfvorgänge vor dem nächsten Training erhöht das Risiko für Folgeverletzungen. Aber gerade im Leistungssport steht die Ressource „Zeit“ nur begrenzt zur Verfügung. Anhand von strukturierten, ausbalancierten Trainingsplänen lässt sich so ein OTS vermeiden. Übertraining hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Trainings-/ Wettkampfleistung und kann daher verheerende Auswirkungen auf die Karriere eines Athleten haben.

Der Hallesche FC als Verein der 3. Liga hat über 40 Pflichtspiele pro Saison, exklusive diverser Vorbereitungs- und Freundschaftsspiele. Durch das Coronavirus hat sich die Situation noch weiter verkompliziert. Es kam zu vermehrten Spielausfällen und daraus resultierenden „Englischen Wochen“ (2-3 Spiele innerhalb einer Woche). Den Höhepunkt erreichte diese Entwicklung zum Ende der Saison 2019/2020 als der Hallesche FC 11 Pflichtspiele in 35 Tagen absolvieren musste. Die Folge solcher Belastungsspitzen sind durch einen signifikanten Anstieg der Verletzungshäufigkeit gekennzeichnet (Platt et al. 2021).

Der Verein hat in dieser Situation erkannt, dass die Belastungssteuerung noch weiter professionalisiert werden muss, um zukünftige Anforderungen bewältigen zu können. So wurde zu der Saison 2020/2021 ein Athletik- und Rehatrainer ins Trainerteam eingebunden und die Profimannschaft des HFC mit dem Polar Team Pro System ausgestattet. Zur Saison 2021/2022 erweiterte der Verein seine Kontrollmechanismen



durch die Einführung eines CK-Monitorings (siehe auch Kapitel 3). Anhand dieser Beispiele ist zu erkennen, wie sehr der Hallesche FC bestrebt ist, modernste wissenschaftliche Methoden zu nutzen, um sich ständig weiterzuentwickeln. Bei dieser Entwicklung hilft nicht nur der Mannschaftsarzt Dr. Thomas Bartels (Sportklinik Halle) in engem Dialog mit dem Staff, sondern auch das Labor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin des Universitätsklinikums Halle (Leitung: Prof. Dr. René Schwesig). In den regelmäßigen Treffen von Vereinsführung, Trainerteam, medizinischer Abteilung und den Experten des Universitätsklinikums werden neueste wissenschaftliche (z. B. Kapitel 5) und leistungsdiagnostische (z. B. Kapitel 4) Erkenntnisse diskutiert und praktikable Ableitungen zum Schutze der Sportler besprochen.

Laktatleistungsdiagnostik

Dreimal jährlich führt der Verein, mit Hilfe des Labors für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin, einen Laufbandstufentest durch (Details siehe Kapitel 4). Der erste Test erfolgt direkt zu Vorbereitungsbeginn und wird als Ausgangswert für die allgemeine Trainingsplanung (Festlegung notwendiger Schwerpunkte) und vor allem für die Trainingssteuerung der Vorbereitung und darüber hinaus genutzt. Es erfolgt die Bestimmung der Schwellen (IAS, IANS) und individuellen Laufbereiche (REKOM, GA1, GA1/2, GA2 und WSA) sowie den daraus resultierenden Trainingsempfehlungen für die Spieler. Für das Monitoring durch das Polar Team Pro System werden die maximale Herzfrequenz, die Ruheherzfrequenz, die aerobe und anaerobe Schwelle ebenfalls erfasst und in das System eingepflegt. Aufgrund dieser zusätzlichen Parameter ist eine individuellere, präzisere und verlässlichere Steuerung der Belastung möglich. Die zweite Laktatleistungsdiagnostik findet kurz vor der Winterpause statt und dient der Überprüfung des konditionellen Leistungsstandes. Außerdem erhalten die Spieler aktuellere und damit adäquate Zeiten für die Läufe in der Wintervorbereitung. Ebenfalls werden die polarspezifischen Parameter aktualisiert. Die dritte und letzte Laktatleistungsdiagnostik erfolgt kurz vor Saisonende und komplettiert damit die Erfassung des konditionellen Entwicklungsverlaufes über die Saison. Außerdem erhalten die Spieler noch einmal aktualisierte Trainingsempfehlungen und Laufbereiche für den Sommerurlaub.

CK Monitoring und subjektive Spielerempfindung (Borg Skala)

Seit dieser Saison wird dreimal wöchentlich bei den Spielern Blut entnommen und der Kreatinkinase (CK) - Wert noch vor der Trainingseinheit bestimmt (siehe Kapitel 3). Zu Beginn jeder Trainingswoche, zumeist Matchday (MD) + 3, wird überprüft, inwiefern Ermüdungen vom Spieltag sich in die neue Trainingswoche übertragen haben und u.U. akkumulieren. So kann das Trainerteam ggf. die kalkulierte Belastung für die Trainingseinheit oder sogar die Trainingswoche adaptieren.

Das zweite Erhebungsfenster ist am Tag vor dem Wettkampf (MD-1) und soll den Trainern dabei helfen, die Spielfähigkeit der Sportler besser einschätzen zu können, mögliche Wechselstrategien zu antizipieren oder hoch belastete Spieler zu schonen. Das letzte Erhebungsfenster ist am Tag nach dem Spiel (MD+1) und spiegelt die erfahrenen Belastungen des Vortags wider.

Für die maximale Auslenkung der CK-Werte werden 24 – 36 Stunden benötigt, jedoch ist dieser Erhebungszeitraum im Fußball schwer realisierbar, da normalerweise nur noch am Tag nach dem Spiel ein Training stattfindet und sich die Spieler zum Zeitpunkt des CK-Peaks in ihrem freien Tag befinden. Durch das wöchentliche Einhalten dieser



Routine entsteht dadurch jedoch kein Nachteil, denn die Werte sind im Längsschnitt untereinander vergleichbar. Ziel ist es, individuelle Referenzdaten zu etablieren, um Belastung und Beanspruchung bei den Spielern verlässlicher erkennen und damit Risiken für Verletzungen minimieren zu können. Besonders bei mehreren Spielen innerhalb einer Woche erweist sich das CK-Monitoring als hilfreiches Beratungstool für mögliche Spielerrotationen.

Während der CK-Messung tragen die Spieler ihr subjektives Empfinden ihrer Ermüdung in eine Borgskala (6 – 20) ein (Abb. 4). Für diese hat sich eine zusätzliche Unterteilung in Ober- und Unterkörper als praktikabel erwiesen, da aufgrund von zusätzlichen Oberkörperkrafttraining einiger Spieler, die CK-Werte nicht im Verhältnis zur Trainings- und Spielbelastung standen. Außerdem steht ein Feld für besondere Vorkommnisse zur Verfügung (schlechter Schlaf, Verletzungen etc.).

CK-WERT-MESSUNG

Datum:		Uhrzeit:				
Nr	Name	Vorname	Bewertung Müdigkeit (6 - 20 Borgskala)		CK-Wert	Auffälligkeiten (Prellungen, Dehnungen, Schlaf, ...) Krafttraining? Ausradeln?
			Oberkörper	Unterkörper		
1	Müller	Sven				
2	Löhmannsöben	Jan				
3	Kastenhofer	Niklas				
4	Otto	Fynn				
5	Vollert	Jannes				
7	Derstroff	Julian				
8	Kreuzer	Niklas				
9	Tilens	Justin				
10	Überwein	Michael				

Abb. 4: Auszug aus dem Erhebungsbogen CK-Messung und subjektive Beanspruchung/ Müdigkeit

Polar Team Pro System

Im Zentrum der Belastungssteuerung steht das Polar Team Pro System, welches dem Trainerteam eine Vielzahl von Live-Daten zur Verfügung stellt. Neben der gelaufenen Distanz, der Anzahl von Sprints, Beschleunigungen und Entschleunigungen sowie Herzfrequenzanalysen bestimmt das System den Trainings Load (Trainingsbelastung). Dieser Parameter bzw. diese Funktion ermöglicht es, unterschiedliche Formen von Trainingseinheiten, wie zum Beispiel kurz und intensiv mit lang und extensiv, vergleichbar zu machen.

Dazu werden die Belastungen in fünf Stufen mit dazugehöriger Regenerationsempfehlung eingeteilt: leicht (0-6 Stunden Regeneration), angemessen (7-12 Stunden Regeneration), fordernd (13-24 Stunden Regeneration), sehr fordernd (25-48 Stunden Regeneration), extrem (mehr als 48 Stunden Regeneration).

Die Einteilungen und Empfehlungen basieren auf der Dauer und Intensität des Trainings, wobei persönliche Daten (z. B. Alter, Geschlecht, VO_{2max} , Trainingshistorie, anaerobe und aerobe Schwelle) in die Berechnung einfließen. Für eine präzisere Nutzung des Trainings Loads während der Einheiten ist es möglich, den Trainings Load-Wert anzeigen zu lassen (Abb. 5). Jener numerische Wert gibt die ungefähre Menge der als Energie verbrauchten Kohlenhydrate und Proteine an und ist demnach subtiler differenziert als der reine Trainings Load. Zwischen diesen beiden Parametern besteht eine enge Wechselbeziehung, welche allerdings von Polar (noch) nicht genau beschrieben wird. Im Trainingsalltag hat sich folgende Einteilung als praktikabel erwiesen: leicht (0-49 Training Load-Wert), angemessen (50-99 Training Load-Wert), fordernd (100-139 Training Load-Wert), sehr fordernd (140-199 Training Load-Wert), extrem (mehr als 199 Training Load-Wert). Hierdurch wird die Belastungssteuerung für das Trainerteam deutlich erleichtert, da viel früher abschätzbar ist, welche Belastungen durch die jeweiligen Trainingsübungen hinzu kommen.

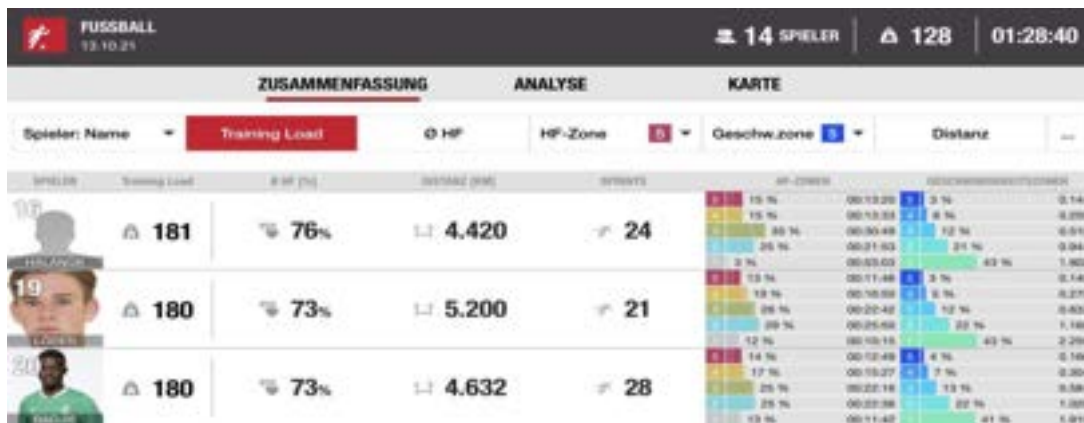


Abb. 5: Auszug aus der Polar Team Pro App

Bei all der Technik und den Hilfsmitteln, die heutzutage zur Verfügung stehen, wird oftmals vergessen, welche zentrale Rolle das Trainerteam noch immer einnimmt. Kein Algorithmus ist in der Lage, so komplex zu urteilen wie ein erfahrener und gut ausgebildeter Trainer. Vor allem bei der Auswahl der passenden Reize zur gegebenen Situation ist das menschliche Knowhow unabdingbar.

Planung der Belastungssteuerung / Trainingskonzept

Wie bereits beschrieben, bildet die Einteilung der Belastung in fünf unterschiedliche Stufen das Fundament der Trainingssteuerung. Stufe eins (leicht – Farbeinteilung dunkelgrün) beschreibt die Belastung einer Regenerationseinheit oder eines Anschwitzens (kurze Einheit am Morgen eines Wettkampftages). Mit Stufe zwei (angemessen – Farbeinteilung hellgrün) wird eine lockere Trainingseinheit mit meist technischem Schwerpunkt beurteilt.



Als mittlere Belastung ist Stufe drei (fordernd – Farbeinteilung gelb) bestimmt. Die vierte Stufe (sehr fordernd – Farbeinteilung orange) ist im Normalfall die höchste im Training zu erreichende Stufe und beinhaltet meistens sehr viele Spielanteile. Im Wettkampf kann sogar Stufe fünf erreicht werden (extrem – Farbeinteilung rot). Anhand der daraus resultierenden Regenerationszeiten wird die Trainingsplanung strukturiert (Abb. 6).

		11.10.2021 - 17.10.2021 (KW41)					
	Montag 11.10.2021	Dienstag 12.10.2021	Mittwoch 13.10.2021	Donnerstag 14.10.2021	Freitag 15.10.2021	Samstag 16.10.2021	Sonntag 17.10.2021
Block 1		11:00 Rehatraining 60' Technik	10:00 Training 3/5 75' inkl. Sprints	10:00 Training 3/5 90' inkl. Koordination exkl. Talentstraining	11:00 Rehatraining 60'	10:00 SE Training 3/5 75' inkl. Reha	08:45 CK Messung 10:00 Regeneration 1/5 Spielersatz 2/5
	Block 2		12:45 CK Messung	14:00 Kraft Reha	12:00 Rehatraining 60'	12:45 CK Messung	14:00 FC Saarbrücken (H)
		14:00 Training 2/5 60' exkl. 30' GA1	14:30 Kraft Gruppe 1 30' 15:15 Kraft Gruppe 2 30'		14:00 Abschlusstraining 2/5 60'	Individuell Rehatraining 50' GA1	

Abb. 6: Beispielhafter Wochenplan der Belastungssteuerung beim HFC

Für das Erreichen der erwünschten Belastungsparameter der Trainingseinheit steht dem Trainerteam eine selbstangelegte Datenbank oft genutzter Trainingsübungen zur Verfügung. In dieser sind geschätzte Werte von zurückgelegter Distanz, Anzahl der Sprints und dem Trainings Load-Wert im Minutendurchschnitt hinterlegt. Mit Hilfe dieser Vorbereitung und der Möglichkeit der Live-Überwachung der Daten ist es problemlos möglich, die Belastung zielgerichtet zu steuern. Entstehen Auffälligkeiten während der Trainingseinheit (z. B. Herzfrequenz zu niedrig, Anzahl der Sprints zu hoch) wird mit Hilfe trainingsmethodischer Veränderungen Einfluss genommen. Diese Option besteht nicht nur im Mannschaftsverbund sondern auch für einzelne Spieler und ermöglicht damit eine individuelle Steuerung des Trainings, welches in eine verbesserte Verletzungsprophylaxe für die Sportler mündet. Ergänzend erfolgt eine wöchentliche, mehrmalige CK-Entnahme, um frühzeitige Marker für Ermüdung und Verletzung zu erkennen. Für jeden Spieler liegen inzwischen sich ständig aktualisierende Referenzbereiche vor in denen er sich im Wochenverlauf befinden darf. Werden diese überschritten wird nach der Ursache gesucht und mit der entsprechenden Methodik reagiert (Trainingsreduktion, regeneratives Training, Pause etc.).

Als weiteres Kontrolltool erfolgt die Dokumentation des subjektiven Befindens anhand der Borg-Skala. Auffällige Werte oder besondere Hinweise der Spieler werden oftmals im gemeinsamen Gespräch erörtert und mit entsprechenden Verfahrensweisen behandelt.

Damit nutzt der Hallesche FC ein breitgefächertes Netz von unterschiedlichsten Diagnoseverfahren, um seine Spieler optimal zu belasten und maximal zu schützen.



Ergänzend werden am Ende jeder Woche die entscheidenden Belastungsdaten komprimiert zusammengefasst und im Verhältnis zu den Vorwochen ausgewertet sowie Ableitungen für die neue Woche getroffen.

Auch ein spezielles wöchentliches Spielmonitoring wird anhand des Polar Team Pro Systems vorgenommen und im nachfolgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

Literatur

Barnes, C., Archer, D.T., et al. (2014). The evolution of physical and technical performance parameters in the English Premier League. *Int. J. Sports Med.*, 35, 1095–1100.

Bradley, P.S., Archer, D.T., Hogg, et al. (2016). Tier-specific evolution of match performance characteristics in the English Premier League: it's getting tougher at the top. *J. Sports Sci.*, 34, 980–987.

Buchwald-Werner S., Naka I., Wilhelm M., et al. (2018). Effects of lemon verbena extract (Recoverben®) supplementation on muscle strength and recovery after exhaustive exercise: a randomized, placebo-controlled trial. *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, 15, 5.

Bush M., Barnes C., Archer D.T., et al. (2015). Evolution of match performance parameters for various playing position in the English Premier League. *Hum. Mov. Sci.*, 39, 1–11.

Cheng A.J., Jude B., Lanner J.T. (2020). Intramuscular mechanisms of overtraining. *Redox Biol.*, 35, 101480.

Clarkson P.M., Byrnes W.C., McCormick K.M., et al. (1986). Muscle soreness and serum creatine kinase activity following isometric, eccentric, and concentric exercise. *Int. J. Sports Med.*, 7, 152–155.

Evans R.K., Knight K.L., Draper D.O., et al. (2002). Effects of warm-up before eccentric exercise on indirect markers of muscle damage. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34, 1892–1899.

Gauche E., Couturier A., Lepers R., et al. (2009). Neuromuscular fatigue following high versus low-intensity eccentric exercise of biceps brachii muscle. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 19, 481–486.

Howatson G., van Someren K.A. (2008) The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.*, 38, 483–503.

Hunter A.M., Galloway S.D., Smith I.J., et al. (2012). Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 22, 334–341.

MacIntyre D.L., Sorichter S., Mair J., et al. (2001). Markers of inflammation and myofibrillar proteins following eccentric exercise in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 84, 180–186.

Martin V., Millet G.Y., Lattier G., et al. (2004). Effects of recovery modes after knee extensor muscles eccentric contractions. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 1907–1915.

Peake J.M., Gandevia S.C. (2017). Replace, restore, revive: the keys to recovery after exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985), 122, 531–532.

Platt B.N., Uhl T.L., Sciascia A.D., et al. (2021). Injury Rates in Major League Baseball During the 2020 COVID-19 Season. *Orthop J Sports Med.*, 9, 2325967121999646.

Racinais S., Bringard A., Puchaux K., et al. (2008) Modulation in voluntary neural drive in relation to muscle soreness. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 102, 439–446.

2 Spielmonitoring mittels Polar Team Pro System

Hintergrund

Das Spielmonitoring mittels GPS-basierter Trackingsysteme gehört mittlerweile zur leistungsdiagnostischen Grundausstattung im professionellen Teamsport, insbesondere im Fußball.

Der HFC sowie das Labor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin (DOUW/UKH) verwenden das Polar Team Pro System (Abb. 7) zur Objektivierung des Trainings und Wettkampfgeschehens. Überdies besteht seitens des DOUW/UKH eine Kooperationsvereinbarung mit dem Hersteller der Polar Electro GmbH Deutschland, die die technische Weiterentwicklung des Messsystems sowie wissenschaftliche Publizierung der Erkenntnisse zum Inhalt hat.

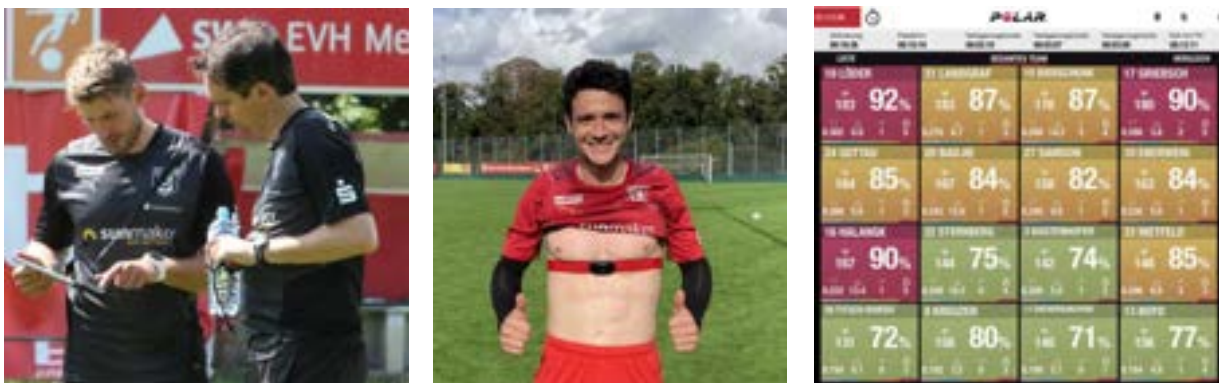


Abb. 7: Einsatz des Polar Team Pro Systems beim HFC

Das Polar Team Pro System enthält ein integriertes GPS (Abtastrate: 10 Hz) sowie MEMS-Bewegungssensorik (Abtastrate: 200 Hz). Mittels Bluetooth ist eine Liveübertragung zum Spielfeldrand möglich. Überdies bietet das System die Möglichkeit, mittels Rohdatenexport (csv.) die Belastungs- und Beanspruchungsdaten (Strecke, Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Herzfrequenz) zu exportieren. Für die im Folgenden vorgestellte Auswerterroutine sowie Ergebnisse erfolgte zusätzlich eine Analyse in MATLAB R2016a (The MathWorks, Natick, MA, USA) durch Dr. Lars Reinhardt.

Im Vorfeld der eigentlichen Anwendung in Training und Wettkampf fand im Rahmen einer Sprintdiagnostik eine Genauigkeitsprüfung statt (Reinhardt et al. 2019). Innerhalb derer konnte im Vergleich zu einem Lichtschrankenmesssystem (AF Sport, Wesel) festgestellt werden, dass die Abweichungen über 10 bzw. 20 m sehr gering sind (10 m: $-0,01 \pm 0,07$ s, CV < 4,5%; 20 m: $-0,01 \pm 0,08$ s, CV < 3,4%; Abb. 8).

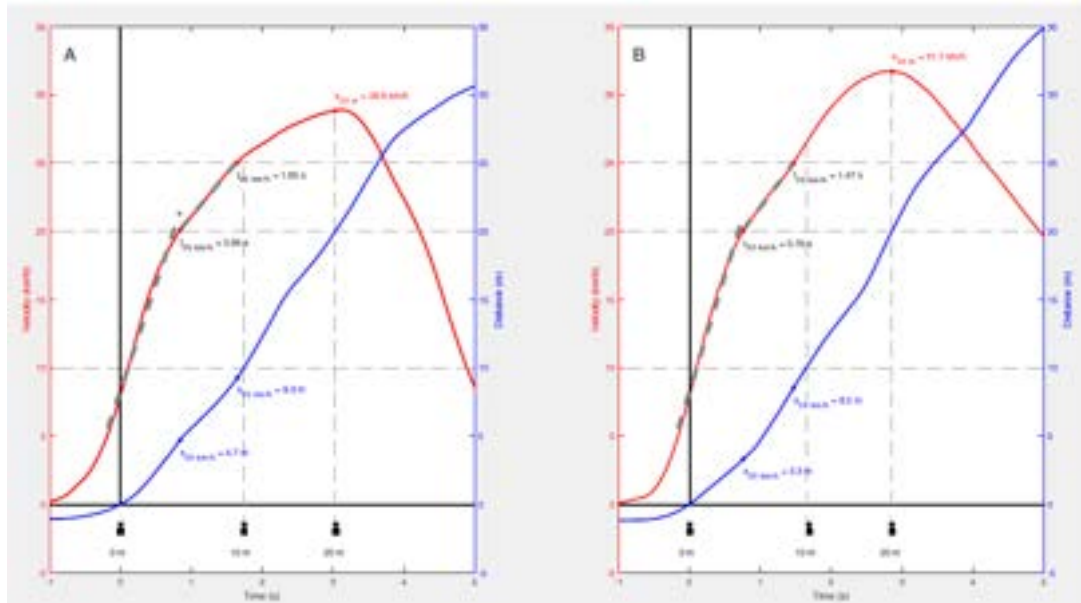


Abb. 8: Ergebnisse eines langsameren (A) und schnelleren (B) Fußballspielers. Die grau gestrichelten Linien symbolisieren die linearen Regressionsgeraden bezogen auf die zwei Phasen der durchschnittlichen Beschleunigung. Die Kamerasymbole repräsentieren die erhobenen Teilzeiten (10 m, 20 m), gemessen mit dem Lichtschrankenmesssystem.

Das Spielmonitoring beinhaltet im ersten Schritt eine positionsspezifische sowie halbzeitenbezogene Analyse ausgewählter, relevanter Belastungsparameter (Tab. 1 und 2).

Tab. 1. Halbzeit 1 - Rankings auf der Basis der individuellen Maxima ausgewählter Laufleistungsparameter; Innenverteidiger: ■ Außenverteidiger: ■ Zentrale Mittelfeldspieler: ■ Flügelspieler: ■ Stürmer: ■

	Anzahl Sprints [n]		über 14,4 km/h [m]		Distanz absolut [m]		Distanz relativ [m/min]	
1	SP1	33	SP5	1571	SP5	5762	SP5	124
2	SP2	30	SP1	1548	SP4	5741	SP4	123
3	SP3	28	SP10	1463	SP1	5693	SP1	122
4	SP4	28	SP4	1372	SP10	5692	SP10	122
5	SP5	27	SP2	1145	SP3	5244	SP3	113
6	SP6	25	SP8	1003	SP7	5170	SP7	111
7	SP7	23	SP6	993	SP6	5148	SP6	111
8	SP8	21	SP7	904	SP8	5113	SP8	110
9	SP9	13	SP9	832	SP2	5102	SP2	110
10	SP10	11	SP3	800	SP9	4733	SP9	102
Σ		239		11.631		55.398		115

SP=Spieler

Tab. 2. Halbzeit 2 - Rankings auf der Basis der individuellen Maxima ausgewählter Laufleistungsparameter; Innenverteidiger: ■ Außenverteidiger: ■ Zentrale Mittelfeldspieler: ■ Flügelspieler: ■ Stürmer: ■

	Anzahl Sprints [n]		über 14,4 km/h [m]		Distanz absolut [m]		Distanz relativ [m/min]	
1	SP6	29	SP5	1421	SP5	5611	SP10	123
2	SP3	25	SP1	1374	SP4	5484	SP5	118
3	SP1	24	SP4	1091	SP3	5388	SP4	115
4	SP7	21	SP7	1025	SP1	5269	SP3	113
5	SP4	19	SP3	1004	SP7	4836	SP13	113
6	SP5	16	SP6	899	SP6	4809	SP8	112
7	SP9	15	SP8	786	SP9	4283	SP1	111
8	SP2	12	SP11	760	SP8	3469	SP11	109
9	SP8	11	SP10	686	SP11	3105	SP12	106
10	SP11	11	SP9	571	SP2	3079	SP7	102
11	SP10	7	SP2	506	SP10	2337	SP6	101
12	SP12	4	SP12	491	SP13	1864	SP2	99
13	SP13	3	SP13	491	SP12	1741	SP9	90
Σ/Ø		197		11.105		51.275		109

Rot markiert sind aus- bzw. eingewechselte Spieler (SP)

Im zweiten Schritt erfolgte eine Auswertung von Aktivitätsphasen (beschleunigungs-basiert) sowie der prozentualen mittleren maximalen Herzfrequenz auf der Basis von 15minütigen Intervallen. Hierbei wurde jeweils eine Grafik für die Startformation (Abb. 9) sowie die Schlussformation (Abb. 10) erstellt.

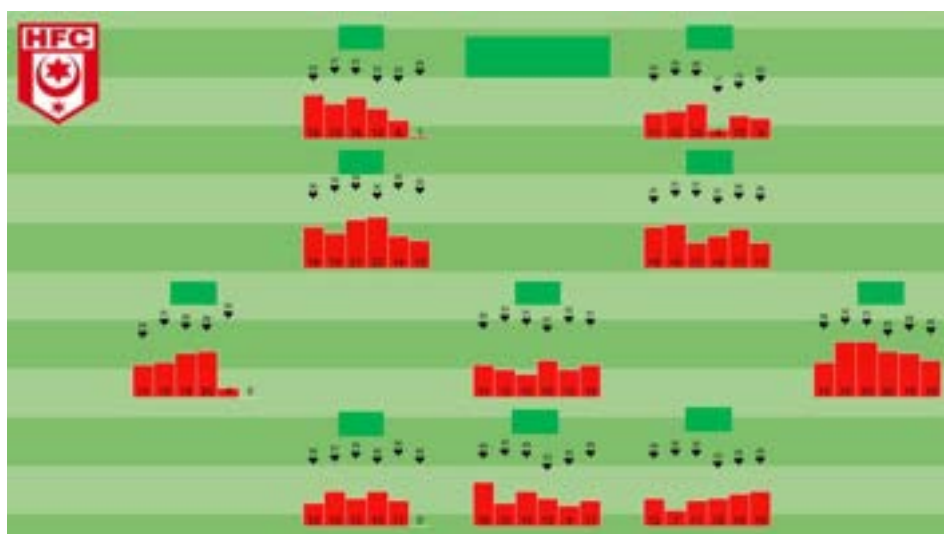


Abb. 9: Spielmonitoring - Aktivitätsphasen der Startformation.



Abb. 10: Spielmonitoring - Aktivitätsphasen der Schlussformation.

Damit ist es möglich, Belastung und (kardiale) Beanspruchung direkt miteinander in Beziehung zu setzen und intraindividuell eine längsschnittliche Spielanalyse vorzunehmen. Somit wird beispielsweise ersichtlich, ob ein Spieler im Laufe des Spieles bzw. der Halbzeit ein Leistungsabfall zu verzeichnen hat und ob dieser physiologisch oder volitiv bedingt ist. Darüber hinaus lassen sich Spielpositionen mit gleichen oder sehr ähnlichen Anforderungsprofilen miteinander vergleichen (z. B. 2 Innenverteidiger oder 2 Außenbahnspieler). Bezogen auf den Saisonverlauf lässt sich für jeden Spieler ein Leistungsprofil erstellen aus dem ersichtlich wird, ob die Leistungskurve abflacht oder ansteigt. Auf diese Weise ist es möglich, u.U. eine Akkumulierung von Ermüdung rechtzeitig zu erkennen und trainingsmethodisch gegenzusteuern.

Bezüglich der intraindividuellen Vergleiche zwischen unterschiedlichen Spielen und den interindividuellen Vergleichen sei darauf hingewiesen, dass hier spieltaktische Erwägungen unbedingt berücksichtigt werden müssen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Insofern obliegt die Auswertung dieser Daten und Analysen dem gesamten Trainerteam.

Leitmotiv für die Erstellung dieser Spielmonitoringsystematik war das Kriterium der Praktikabilität und schnellen Lesbarkeit. Auf maximal 2 Seiten sollte dem Trainerteam innerhalb von maximal 24 Stunden eine suffiziente Analyse der Spieldaten offeriert werden, die überdies nahezu selbsterklärend ist.

Literatur

Reinhardt L., Lauenroth A., Schwesig R., Schulze S., Kurz E. (2019). Enhanced sprint performance analysis in soccer: New insights from a GPS-based tracking system. *PLoS One*, 14(5), e0217782.

3 Längsschnittliche CK-Messungen im Kontext eines komplexen Belastungs-Beanspruchungsmonitorings

Hintergrund

Wie einleitend bereits beschrieben, ist die Kreatinkinase (CK) ein Ermüdungsindikator, der den Biomarkern zuzuordnen ist (Abb. 3). 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 von CK und anderen Muskelenzymen ist möglicherweise bedingt durch eine erhöhte Permeabilität der Zellmembran von Muskelzellen (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, wie bereits erwähnt, typischerweise 24 – 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 (z. B. Bergablaufen, Landung nach Sprung) zu verzeichnen, mit Peak-Werten nach ca. 96 Stunden (Brancaccio et al. 2010).

Datenerhebung

Beim Drittligateam des HFC werden von jedem Pflicht- oder Testspiel Belastungs- und Beanspruchungsdaten erhoben (Abb. 11). Dies nicht nur am Spieltag selbst (Borg, Spieldaten) sondern auch im Vorfeld (Tag vor dem Spiel = MD-1) sowie am ersten und dritten Tag nach dem Spiel (MD+1, MD+3).

HEIMSPIEL - 8. SPIELTAG - TSV 1860 MÜNCHEN - 12.09.2021									
11.09.2021 MD-1	Borg (Maximum) MD-1	Spielzeit [min] MD	Distanz [m] MD	Sprints MD	Beschleunigung (+2,8 und +2,0 m/s ²) MD	11.09.21 MD+1	Borg (Maximum) MD+1	13.09.21 MD+3	Borg (Maximum) MD+3

Abb. 11: Belastungs- und Beanspruchungsspielmonitoring rund um den Spieltag (match day = MD). Erfasst werden die CK-Werte sowie die empfundene subjektive Beanspruchung mittels Borgskala (6-20) einen Tag vor (MD-1) und nach (MD+1) dem Spiel sowie 3 Tage nach dem Spiel (MD+3). Die Quantifizierung der Laufbelastung erfolgt mittels Spielzeit, Laufdistanz, Anzahl der Sprints und Beschleunigungen.

Hauptziel der Datenerhebung und –analyse ist die individuelle Belastungssteuerung. Darüber hinaus lassen sich mit diesen Daten folgende Aspekte bearbeiten:

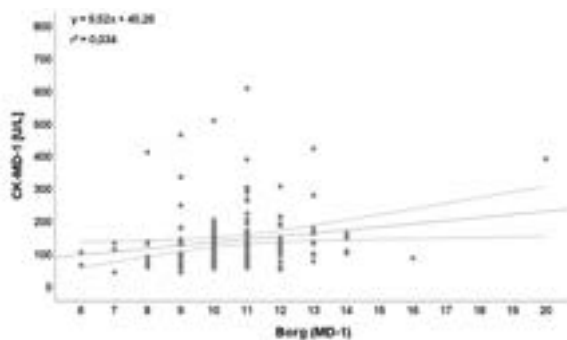
1. Inwiefern korreliert das subjektive Belastungsempfinden (Borg) mit der muskulären Ermüdung (CK).
2. Welcher Belastungsparameter hat den größten Einfluss auf die subjektive und objektive Beanspruchung. Hypothetisch ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Beschleunigungen pro Zeiteinheit den größten Varianzanteil erklärt.

3. Wie verändert sich die Laufleistung in Abhängigkeit von der Erholungszeit (“englische Wochen”)?
4. Sind subjektive und objektive Beanspruchung vom MD-1 und MD+3 nicht signifikant unterschiedlich?
5. Lässt sich für alle 3 Messzeitpunkte (MZP) ein “Korridor” im Sinne von Referenzwerten definieren?

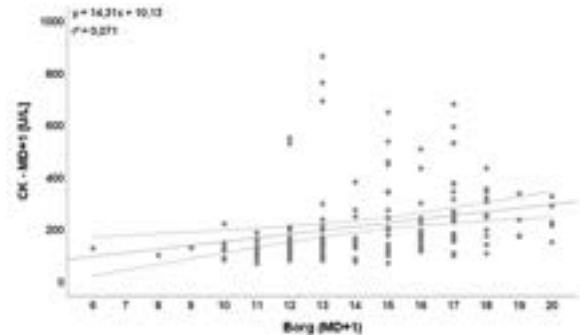
Ergebnisse

Der Ergebnisdarstellung sei vorangestellt, dass in die Analyse 11 Spiele (148-157 Datensätze) eingingen. Zwischen dem subjektivem Belastungsempfinden (Borg) und der muskulären Ermüdung (CK) zeigte sich nur zum MZP MD+1 eine nennenswerte Korrelation ($r=0,467$; Abb. 12b). Zum MD-1 und MD+3, die beide Regenerationszustände widerspiegeln, fanden sich hingegen keine nennenswerten Korrelationen (Abb. 12a,c). Die Varianzaufklärungen bewegten sich hier zwischen 1% (MD+3) und 3% (MD-1) und waren damit deutlich niedriger als zum MD+1 (7%), der den Ermüdungszustand nach dem Spieltag (MD) abbildet.

a) MD-1



b) MD+1



c) MD+3

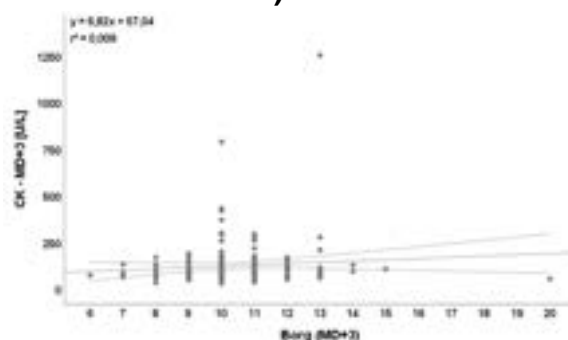


Abb. 12a-c: Beziehungen zwischen subjektivem Belastungsempfinden (Borg) und muskulärer Ermüdung (CK) in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (MZP).

Deutliche größere Beziehungen fanden sich zwischen dem subjektivem Belastungsempfinden (Borg), der muskulären Ermüdung (CK) und polarspezifischen Parametern (Trainings- und Cardioload) auf der einen Seite sowie den Spielparametern auf der anderen Seite (Tab. 3).



Tab. 3. Korrelationen (r) zwischen den Ermüdungsparametern (Borg, CK) und den polarspezifischen Parametern Trainings- und Cardioload sowie ausgewählten Belastungsparametern aus dem Spiel (MD+1). a=Beschleunigung. r>0,5 fett hervorgehoben. n=142

	Spielbelastungsparameter			
	Spielzeit	Laufdistanz	Sprints (a>2,8 m/s ²)	Beschleunigungen (2,0<a<2,8 m/s ²)
CK	0,313	0,373	0,405	0,394
Borg	0,627	0,616	0,425	0,540
Trainingsload	0,844	0,855	0,581	0,737
Cardioload	0,815	0,847	0,613	0,754

Trainings- und Cardioload determinieren sich demnach am stärksten über Spielzeit und Laufdistanz, wie die Varianzaufklärungen von 70-73% belegen. Ebenfalls hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Beschleunigungen, die ebenfalls über 50% Varianzaufklärung seitens Trainings- und Cardioload liefern (Tab. 3).

Fügt man der Analyse noch die kardiale Komponente in Form des prozentualen Anteils des Bereichs zwischen 90 und 100% hinzu, so ergibt sich folgendes Bild (Tab. 4):

Tab. 4. Korrelationen (r) zwischen den Ermüdungsparametern (Borg, CK) sowie den polarspezifischen Parametern Trainings- und Cardioload inklusive des HF-Bereiches zwischen 90 und 100% (MD+1). HF=Herzfrequenz. r>0,5 fett hervorgehoben. n=142

	Spieldatenbeanspruchungsparameter		
	Trainingsload	Cardioload	HF90-100%
CK	0,356	0,352	0,200
Borg	0,612	0,571	0,197

Borg und CK korrelieren nur schwach miteinander (r=0,266), wohingegen der hochintensive kardiale Bereich relevante Korrelationen zum Trainingsload (r=0,600) und Cardioload (r=0,674) aufweist. Für das subjektive Belastungsempfinden spielen muskuläre und kardiale Ermüdung offensichtlich nur eine untergeordnete Rolle sondern sind es vielmehr die Spielzeit (r=0,627) und die zurückgelegte Laufstrecke im Spiel (r=0,616), die den Borgwert in hohem Maße determinieren.

Betrachtet man die drei Erhebungszeitpunkte varianzanalytisch (Tab. 5) seitens der Parameter Borg und CK, so zeigen sich erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede zwischen MD-1 und MD+3, jedoch ein signifikanter Anstieg zum MD+1.

Tab. 5. Varianzanalytischer Vergleich der 3 MZP bezüglich Borg und CK. Mittelwert \pm Standardabweichung. n=117 (CK) und n=107 (Borg)

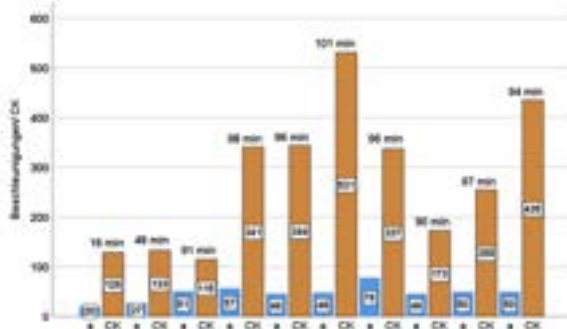
	MD-1 (MW \pm SD)	MD+1 (MW \pm SD)	MD+3 (MW \pm SD)	Varianzanalyse		
				Haupteffekt		Teileffekte
				p	η_p^2	η_p^2
CK	138 \pm 92,0	220 \pm 153	131 \pm 128	<0,001	0,23	MD-1/ MD+1: 0,31 MD+1/ MD+3: 0,32
Borg	11 \pm 1,39	14 \pm 2,45	11 \pm 1,57	<0,001	0,59	MD-1/ MD+1: 0,65 MD+1/ MD+3: 0,63

Hier ist auffällig, dass die Unterschiede seitens des subjektivem Belastungsempfindens (Borg) für beide Vergleiche (MD-1 vs. MD+1 und MD+1 vs. MD+3) nahezu doppelt so hoch sind wie für die CK-Werte ($\eta_p^2=0,31-0,32$ vs. $\eta_p^2=0,63-0,65$). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die CK-Werte insgesamt deutlich stärker streuen als die Borgwerte. Dies gilt insbesondere für MD+3 mit einem Variabilitätskoeffizienten (VK) von 98% (MD-1: 67%; MD+1: 70%). Dagegen bewegt sich der VK bei den Borgwerten auf einem ungleich niedrigeren Niveau (13, 18, 14%).

Dies unterstreicht noch einmal die Notwendigkeit, die CK-Werte individuell zu betrachten. Aus diesem Grund wird im Folgenden (Abb. 13a-b) keine längsschnittliche Teamanalyse bezüglich der CK-Werte präsentiert.

Vielmehr werden die CK-Werte von den 2 Spielern analysiert, die einen vollständigen Datensatz über alle Spiele aufwiesen.

a) Spieler a



b) Spieler b

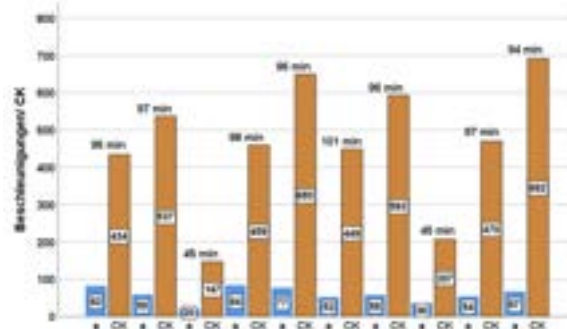


Abb. 13a-b: Fallbeispiele für den längsschnittlichen Verlauf der CK Werte in Relation zur Spielzeit sowie der Anzahl der Beschleunigungen.

Auf eine Normierung der Anzahl der Beschleunigungen bezüglich der Spielzeit wurde bewusst verzichtet, da sich dies in der Praxis als wenig hilfreich für die Trainer erwies. Beispielsweise wurde, wie in Kapitel 2 beschrieben, eine 15 minütige Skalierung der Laufparameter vorgenommen, was seitens der Trainer aber eher irreführend wahrgenommen wurde, da zumeist in "ganzen Spielen" gedacht und interpretiert wird. Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle auch, dass selbst die Spielzeitnormierung insofern interpretativen Einschränkungen unterliegt als das ein Spieler auf unterschiedlichen Positionen eingesetzt oder auf der gleichen Position mit abweichenden taktischen Vorgaben betraut sein kann. Auch die im Vorfeld einer Partie



stattfindende Limitierung der Spielzeit (z. B. nur eine Halbzeit im Pokalspiel gegen unterklassigen Gegner) führt zu einer eingeschränkten Vergleichbarkeit der Daten. Analysiert man den Spieler A (Abb. 13a) so fällt auf, dass sich die Anzahl der Beschleunigungen, bezugnehmend auf vollständige Spiele (90 +x min), in einer engen Range von 46 bis 57 bewegt. Einzig ein Spiel (7) weist hier eine deutlich größere Anzahl von Sprints (78) auf, ohne dass dies zu einem maximalen CK-Wert geführt hätte (337 U/L). Dieser wurde im Spiel 6 (531 U/L) bei einem gleichzeitig geringem Beschleunigungsoutput (48) erzielt. Unisono zeigten beide Spieler jeweils zu Saisonbeginn die beste Relation zwischen Laufbelastung und muskulärer Ermüdung (Spieler A: 51/ 115 U/L; Spieler B: 82/ 434 U/L).

Betrachtet man die Tendenz der Beschleunigungen für beide Spieler so fällt auf, dass Spieler A im Vergleich der ersten 4 und letzten 3 Spiele (Ausreißer 78 wurde nicht berücksichtigt) sich auf einem konstanten (51 vs. 49 Beschleunigungen), im Vergleich zu Spieler B (76 vs. 58 Beschleunigungen), niedrigeren Niveau bewegt. Spieler B zeigt hier einen deutlichen Abfall (-24%), der ihn allerdings immer noch über dem Niveau von Spieler A belässt.

Literatur

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

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

Cannon J.G., Orencole S.F., Fielding R.A., Meydani M., Meydani S.N., Fiatarone M.A., Blumberg J.B., Evans W.J. (1990). Acute phase response in exercise: Interaction of age and vitamin E on neutrophils and muscle enzyme release. *Am. J. Physiol.*, 259, 1215–1219.

Lee E.C., Fragala M.S., Kavouras S.A., Queen R.M., Pryor J.L., Casa D.J. (2017). Biomarkers in Sports and Exercise. *J. Strength Cond. Res.*, 31, 2920–2937.

Maxwell J.H., Bloor C.M. (1981). Effects of Conditioning on Exertional Rhabdomyolysis and Serum Creatine Kinase after Severe Exercise. *Enzyme*, 26, 177–181.

Meyer T., Meister S. (2011). Routine Blood Parameters in Elite Soccer Players. *Int. J. Sports Med.*, 32, 875–881.

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.

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, 3279, 1–28.

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.

4 Ausdauerleistungsdiagnostik in Liga 3 – Aufbau und Etablierung einer Referenzdatenbank

Hintergrund

Die Ausdauerleistungsfähigkeit, insbesondere die aerobe Kapazität (Grundlagenausdauer), ist nicht nur aus Sicht der Verletzungsprophylaxe von besonderer Bedeutung. So konnte Gabbett (2020) zeigen, dass ein hohes Niveau an Grundlagenausdauer ebenso verletzungsprotektiv ist, wie ein hohes Niveau an Relativkraft der unteren Extremität (Abb. 14).



Abb. 14: Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von der Grundlagenausdauer und der Relativkraft der unteren Extremität (Gabbett 2020, S. 61-62).

In einer eigenen Untersuchung (Reinhardt et al. 2020), auf die im nächsten Kapitel noch ausführlich eingegangen wird, konnten wir den Nachweis erbringen, dass auch die Erholungsfähigkeit nach fußballspezifischen Belastungen (3 gegen 3) in sehr enger Beziehung ($r=0.91$) zur Geschwindigkeit an der 4 mmol Schwelle steht.

Insofern legen wir sehr großen Wert auf eine suffiziente und stetige Erfassung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu definierten Zeitpunkten:

- jeweils am Ende der Hin- bzw. Rückserie (Trainingssteuerung GA-Training im Urlaub),
- 2-4 Wochen nach Saisonbeginn (angenommener Formhöhepunkt).

Hierbei wird eine standardisierte Ausdauerleistungsdiagnostik (Abb. 15) unter Verwendung von Herzfrequenz- und Laktatanalytik (Polar Team Pro System, Super GL compact, Dr. Müller Gerätebau GmbH, Freital) auf einem dynamometrischen Laufband (h/p/cosmos quasar, inklusive FDM-T System, zebri Medical GmbH, Isny) durchgeführt. Seitens der Laktatanalytik wird das Dickhuth-Modell (aerobe Schwelle = minimales Laktat-Leistungsäquivalent) verwendet.



Abb. 15: Testprotokoll sowie Durchführung (Terence Boyd), Ergebnisse und Analysen seitens der Laufbandleistungsdiagnostik mit Laktat- und Herzfrequenzanalytik

Mittels zweidimensionaler Videoanalyse und integrierter Druckmessplatte (Abb. 16) ist zeitsynchron auch eine Laufstilanalyse möglich, um beispielsweise Veränderungen des Laufstils in Abhängigkeit von der Ermüdung abzubilden oder den Prozess „return to competition“ nach einer Verletzung evidenzbasiert zu begleiten.

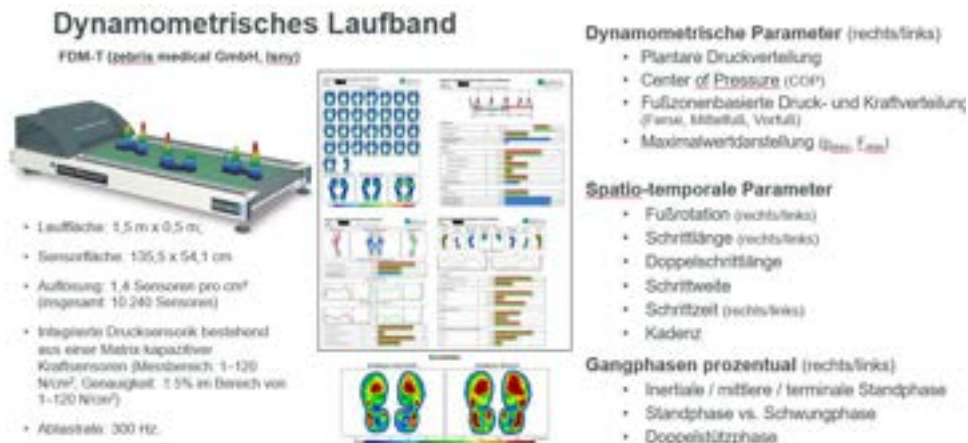


Abb. 16: Apparative Laufstilanalyse

Seitens der Beurteilung der Ausdauerleistungs- und Erholungsfähigkeit ist es in den letzten Jahren gelungen, eine hinreichend große (n=206) und positionsspezifische Referenzdatenbank aufzubauen (Tab. 6). Die Datenbank beinhaltet 133 Spieler aus der 3. Liga und 73 Spieler aus der Regionalliga Nordost.

Dabei ist anzumerken, dass für mehrfach getestete Spieler eine Mediananalyse vorgenommen wurde, um korrelierte Beobachtungen zu vermeiden (Schwesig et al. 2019). Überdies waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ligen 3 und 4 zu beobachten ($\eta_p^2 < 0.02$).

Tab. 6. Perzentilanalyse für die Laufgeschwindigkeiten an den fixen Laktatschwellen (2 mmol/l, 4 mmol/l, 6 mmol/l) sowie die kardiale und metabolische Erholungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Spielfeldposition. Leistungsmaxima basierend auf dem Perzentil 50 sind fett markiert.

	Tor (n=11)	IV (n=37)	ZM (n=49)	Außen (n=78)	Stürmer (n=31)	Total (n=206)
2 mmol/l Laktatschwelle [km/h]						
P10	8,69	9,61	10,7	10,5	8,58	10,2
P25	9,75	11,1	11,4	11,3	11,2	11,2
P50	11,2	12,0	12,4	12,2	12,2	12,1
P75	11,4	13,4	13,4	13,1	12,9	13,0
P90	12,5	14,1	14,2	14,1	13,9	14,0
4 mmol/l Laktatschwelle [km/h]						
P10	12,4	13,5	13,7	13,8	13,3	13,6
P25	12,5	14,4	14,4	14,6	14,2	14,4
P50	14,3	15,0	15,2	15,2	14,8	15,1
P75	14,8	15,8	16,1	15,9	15,9	15,8
P90	15,2	16,3	16,6	16,6	16,4	16,5
6 mmol/l Laktatschwelle [km/h]						
P10	13,9	15,0	15,3	15,5	15,3	15,3
P25	14,1	15,9	15,9	15,9	15,8	15,9
P50	15,8	16,5	16,5	16,7	16,2	16,5
P75	16,4	17,2	17,5	17,4	17,2	17,3
P90	16,8	17,7	17,9	18,2	18,0	17,9
Kardiale Erholung [%]						
P10	2,61	2,74	3,21	3,09	3,07	3,02
P25	2,79	3,54	3,65	3,81	3,39	3,58
P50	3,58	4,19	4,23	4,12	3,76	4,08
P75	4,39	4,59	5,03	4,56	4,13	4,56
P90	4,61	4,99	5,42	5,11	4,92	5,12
Metabolische Erholung/ Laktatabbaurrate [mmol/l/min]						
P10	-0,21	-0,28	-0,13	-0,15	-0,25	-0,17
P25	0,16	-0,07	0,01	-0,02	0,02	0,00
P50	0,22	0,18	0,13	0,12	0,16	0,16
P75	0,34	0,33	0,30	0,23	0,33	0,28
P90	0,38	0,41	0,46	0,33	0,38	0,37

Tor = Torhüter, IV = Innenverteidiger, ZM = Zentrales Mittelfeld

Entsprechend dem positionsspezifischen Anforderungsprofil finden sich die meisten (3/5) Leistungsmaxima bei den zentralen Mittelfeldspielern. Positionsübergreifend hat sich für den Parameter v4 eine Laufgeschwindigkeit von 15,1 km/h (4,19 m/s) als trennscharf erwiesen. In der Fußballpraxis wird vielfach ein Wert von 4,0 m/s als Cut-off Wert genannt, ohne das hierfür eine belastbare Quelle genannt werden kann. In der Regel wird Föhrenbach et al. (1986) hiermit in Verbindung gebracht.

Bezüglich der Beurteilung der Erholungsfähigkeit ist anzumerken, dass diese auf eine sechsminütigen aktiven Erholung (2 x 3 min Laufen mit 8 km/h) basiert. Auf dieser Grundlage wird die prozentuale Abnahme der Herzfrequenz pro Minute ausgehend vom Herzfrequenzmaximum bei Belastungsende berechnet. Seitens des Laktat- abbaus wird die Differenz zwischen dem Belastungsende und dem Laktatwert in Erholungsminute 6 berechnet und durch 6 dividiert.

Diese Referenzdaten ermöglichen eine valide parameter- und positionsspezifische Einordnung und Bewertung der Testergebnisse (Abb. 17). Im Interesse der verdichteten Ergebnispräsentation für Trainer und Spieler erfolgt eine „Ampel- darstellung“ auf der Basis der Perzentile 25 und 75 (Interquartilbereich). Unterhalb und oberhalb werden die Spieler grün bzw. rot eingefärbt. Der Interquartilbereich erhält eine gelbe Kennzeichnung.

Tab. 13. Leistungen an der 2mmol-Laktatschwelle (v2) in den Saisons 2020/2021 und 2021/2022. Perzentil 25: 11,3 km/h; Perzentil 75: 13,1 km/h (n=450).

	Laktatschwelle v2 [km/h]					
	01/2020	08/2020	06/2021	12/2021	05/2022	08/2022
1	15,2	13,9	13,1			
2	14,8	12,9	13,3			
3	14,3	12,4	12,2			
4	14,2	12,4	11,7			
5	14,1	12,1	11,6			
6	13,9	11,9	11,4			
7	13,8	11,3	11,3			
8	13,7	10,7	11,2			
9	13,7	10,4	11,1			
10	12,6	10,1	11,0			
11	12,5	9,9	10,8			
12	12,4	9,9	10,6			
13	12,2	9,9	10,2			
14	12,2	9,7	10,2			
15	12,0	9,3	9,9			
16	11,6	9,2	9,9			
17	11,1		9,1			
18	11,0		7,8			
19	10,1		8,6			
20	9,4					

Abb. 17: Parameterspezifische Beurteilung der Spieler basierend auf der Referenzdatenbank beispielhaft an der 2 mmol-Schwelle dargestellt

Diese Vorgehensweise erlaubt sowohl eine individuell-längsschnittliche als auch teambezogene Analyse. Je größer die grünen Anteile, desto überdurchschnittlicher das Leistungsniveau des Teams in dem entsprechenden Parameter (vice versa rot).



Schlussfolgerungen & Ausblick

Die Etablierung eines standardisierten Testprotokolls (Startgeschwindigkeit: 7,2 km/h, Increment: 1,8 km/h, Stufenpause: 45 s, aktive Erholung: 2 x 3 min bei 8 km/h) hat sich rückblickend als sehr zielführend erwiesen. Vor dem Test sollte unbedingt die konkrete Zielstellung definiert werden (z. B. Ausbelastung, maximale Herzfrequenz, Trainingsbereichsfestlegung). Dies ist insofern von Bedeutung, als dass eine maximale Ausbelastung die nachfolgende Erholung negativ beeinflusst und den Spieler im „Erholungsranking“ schlechter abschneiden lässt.

Aus diesem Grund sollten Leistungs- und Erholungsranking separat erstellt und nicht summativ zu einem Gesamtranking zusammengeführt werden. Ist die Bestimmung der Erholungsfähigkeit das primäre Ziel, sollte die letzte Belastungsstufe (19,8 km/h) nicht mehr absolviert werden, um laktazide Belastungsspitzen und ein Nachschwingen (E3 und E6) dieses Parameters zu vermeiden.

Literatur

Foehrenbach R., Buschmann J., Liesen, H., et al. (1986). Schnelligkeit und Ausdauer bei Fußballspielern unterschiedlicher Spielklassen. / Endurance and sprinting performance of soccer players of different levels. *Swiss Sports Exerc. Med.*, 34, 113–119.

Gabbett T. J. (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.

Reinhardt L., Schulze S., Kurz E., et al. (2020). Heart rate recovery in small-sided games is strongly related to v4 in soccer players. *Sports Med Open*, 6, 43.

Schwesig R., Schulze S., Reinhardt L., et al. (2019). Differences in player position running velocity at lactate thresholds among male professional German soccer players. *Front Physiol.*, 10, 886.



5 Fußballspezifische Leistungsdiagnostik - vergleichende Analyse Ausdauerleistungsdiagnostik und small sided games

Hintergrund

Eine in der Fußballpraxis häufig anzutreffende Problematik ist die Verstetigung leistungsdiagnostischer Maßnahmen zu definierten Zeitpunkten über den Saisonverlauf. Als Gründe werden hier seitens der Verantwortlichen (Trainer, Sportdirektor) die hohe Spieldichte oder die Belastung/Beanspruchung der Spieler (z. B. infolge Verletzungen oder „englischen Wochen“) genannt. Aus wissenschaftlicher Perspektive ist anzumerken, dass es mitunter schwierig ist, die Trainer/Sportdirektor von einzelnen leistungsdiagnostischen Maßnahmen zu überzeugen, da diese in der Regel nicht validiert sind (Schwesig et al. 2016). Generell ist die Frage zu stellen, inwieweit Tests, seien sie auch noch so komplex und fußballspezifisch, valide genug sind, um einen möglichst hohen Anteil an Spielwirksamkeit zu erklären. Schwesig et al. (2013) entwickelten und evaluierten einen Fußballspezifischen Komplextest (FBKT). Als Goldstandards für die Validierung wurden die Spielzeit, das Trainerranking sowie die Ligazugehörigkeit 18 Monate später verwendet. Hypothetisch wurde davon ausgegangen, dass leistungsstarke Spieler mehr Spielzeit erhalten als leistungsschwächere Spieler und diese prospektiv sich auch in höheren Ligen wiederfinden. Bezüglich der Beurteilung durch den Trainer war die Maßgabe, die Leistungsfähigkeit des Spielers vor dem Hintergrund seiner Bedeutung für den Teamerfolg einzuschätzen.

Hinsichtlich des FBKT erzielten die Parameter „Summe aller linearen Sprints“ (24%) und die „Gesamtzeit aller Handlungsfolgen mit Strafzeit in Runde 2“ (22%) die größten Varianzaufklärungen. Das Trainerranking generierte signifikante Odds Ratios zur Gesamtzeit des Tempodribblings (TD) innerhalb des FBKT (OR = 1,3; KI: 1,2 – 199,5; $p = 0,036$) aus einem Proportional-Odds-Modell. Bezüglich der Ligazugehörigkeit ließ sich ebenfalls die Gesamtzeit des TD aus dem FBKT (OR = 1,3; KI: 1,01 – 1,61; $p = 0,044$) als validen Faktor ermitteln (Schwesig et al. 2013).

Die Studie zeigte, dass fußballspezifische Tests nicht per se aufgrund ihrer größeren logischen Validität auch seitens der Konstruktvalidität fußballunspezifischen Tests (z. B. isolierter Sprinttest) überlegen sind. Jedoch beschränkt sich ihre Aussagekraft nicht nur auf die Leistungsbeurteilung. So liefert der FBKT auch konkrete Hinweise für die Trainingssteuerung. Seine vergleichsweise geringe Validität ist u. U. auf die geringe Leistungsfähigkeit der Spieler in fußballspezifischen Handlungsfolgen (Flanken, Torschüsse) zurückzuführen, die eine Differenzierung der Spieler stark einschränkte.

Idee

Im Lichte dieser Ergebnisse haben wir uns die Frage gestellt, wie sich das „Gap“ zwischen Testleistung und Wettkampfleistung am ehesten schließen lässt, um das Spannungsfeld zwischen Spielwirksamkeit, Athletiktraining und Leistungsdiagnostik am effektivsten zu bearbeiten (Abb. 18).



Abb. 18: Spannungsfeld zwischen Spielwirksamkeit, Athletiktraining und Leistungsdiagnostik im Teamsport

Im Ergebnis dieses Diskurses sind wir zunächst zu der Erkenntnis gelangt, dass der Wettkampf die ideale Testsituation darstellt (Abb. 19).



Abb. 19: Neuer, modifizierter Ansatz zur Leistungsdiagnostik im Teamsport am Beispiel Fußball. LD = Leistungsdiagnostik

Der Makel der fehlenden Standardisierung (Abb. 19) lässt sich über eine hinreichend große Anzahl von Spielen weitestgehend kompensieren. Allerdings ist dem Spiel in seiner originären Form (11 gegen 11) auch eine hohe Positionsspezifität inhärent. Deshalb verfeinerten wir den o.g. neuen/modifizierten Ansatz zur Leistungsdiagnostik dahingehend, als dass der komplexe, fußballspezifische Testansatz (FBKT) durch

einen ebenfalls fußballspezifischen aber wesentlich praktikableren Testansatz der „small sided games“ weiter entwickelt wurde. Damit verbindet sich die Intention, fußballspezifisch und positionsunabhängig die Leistung der Spieler erfassen und bewerten zu können, ohne den Trainingsprozess „zu stören“.

Zusätzlich versuchten wir, den bisher verwendeten und etablierten Laufbandstufentest (Kapitel 4) anhand dieser fußballspezifischen Daten zu prüfen.

Testdesign small sided games

Dem Laufbandstufentest (Kapitel 4; Schwesig et al. 2019) folgte im Abstand von einer Woche ein „3 gegen 3“ (Spielfeldgröße: 40 x 30 m), wie es ein sehr verbreitetes Trainingsmittel im Fußball ist (Abb. 20). Im Vorfeld des „3 gegen 3“ fand eine standardisierte 15 minütige Erwärmung der Spieler durch das Trainerteam statt. Diese orientierte sich an den Inhalten der üblichen Spielerwärmung. Das „3 gegen 3“ beinhaltete sechs 90sekündige Belastungen, die durch jeweils 90 s Pause (passiv) unterbrochen wurden. Zu Beginn jeder 90 s Belastung erfolgte ein 40 m Sprint, um ein einheitlich hohes kardiopulmonales Ausgangsniveau der Spieler zu gewährleisten (Reinhardt et al. 2020).

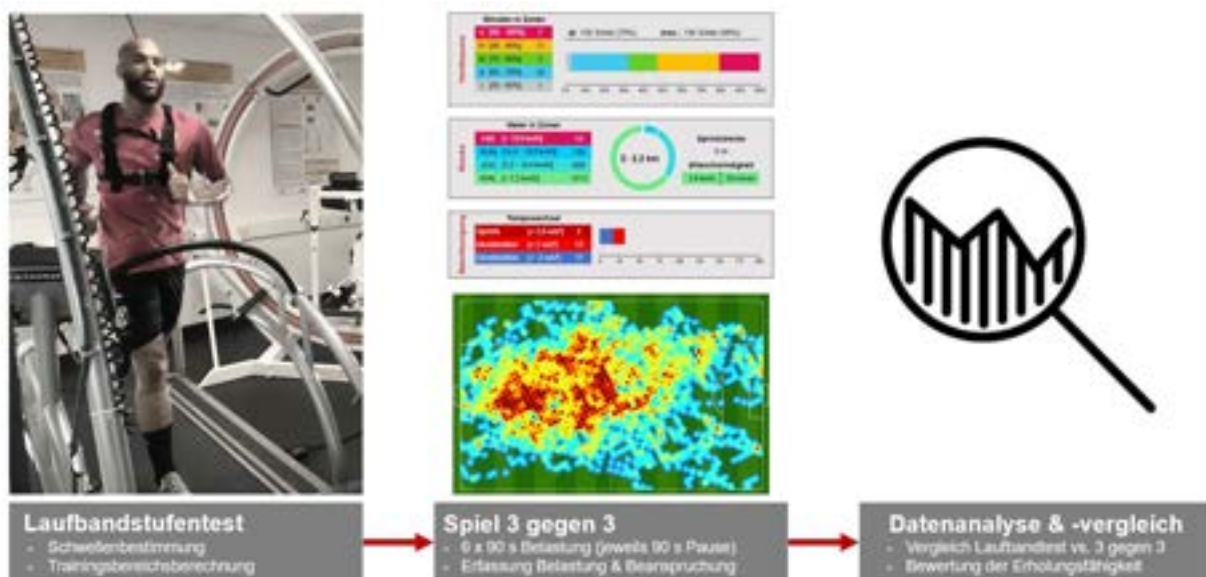


Abb. 20: Testdesign und Auswertungsstrategie small sided games

Testmethodisch wurden Herzfrequenz (kontinuierlich), Belastungsdaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Strecke) sowie Laktatwerte (in jedem zweiten Pausenintervall) erhoben, um Belastung und Beanspruchung miteinander in Beziehung setzen zu können.

Hierbei kam das Polar Team Pro System (Polar Electro GmbH, Kempele, Finland) sowie eine enzymatisch-amperometrische Laktatanalytik (SUPER GL compact, Dr. Müller Gerätebau GmbH, Freital) zum Einsatz.

Testanalytisch war die Herzfrequenzerholung von 90 auf 80% des individuellen Maximums nach der letzten (6.) Belastung von zentraler Bedeutung (Abb. 21).

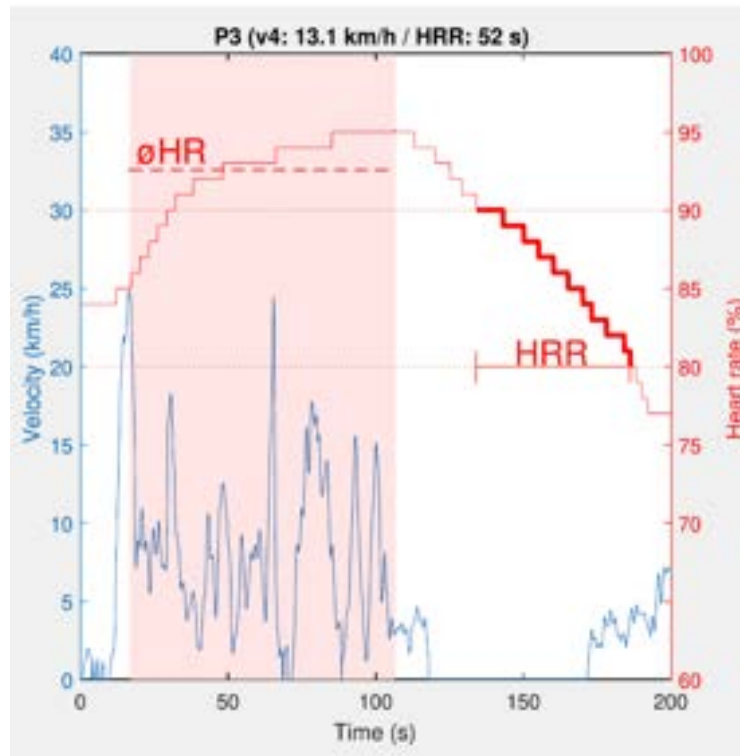


Abb. 21: Beispielhafter zeitlicher Verlauf von Geschwindigkeit (blaue Kurve) und Herzfrequenz (in Prozent der maximalen Herzfrequenz, rote Kurve) während der letzten 90sekündigen Belastung (dargestellt durch ein transparentes rotes Rechteck) des 3 gegen 3 und der anschließenden Erholungsphase. Die durchschnittliche Herzfrequenz ($\bar{\text{HR}}$) während der Spielphase wird als gepunktete rote Linie angezeigt. Der Zeitraum zur Bestimmung der Herzfrequenzerholung (HRR; Abnahme der Herzfrequenz von 90 auf 80%) ist fett (rot) markiert (Reinhardt et al. 2020, S. 4).

Ergebnisse & Erkenntnisse

Abbildung 22 bündelt die Belastungs- und Beanspruchungsparameter aus dem „3 gegen 3“ sowie den Vergleich zur Geschwindigkeit an der v4 (Laufbandstufentest).

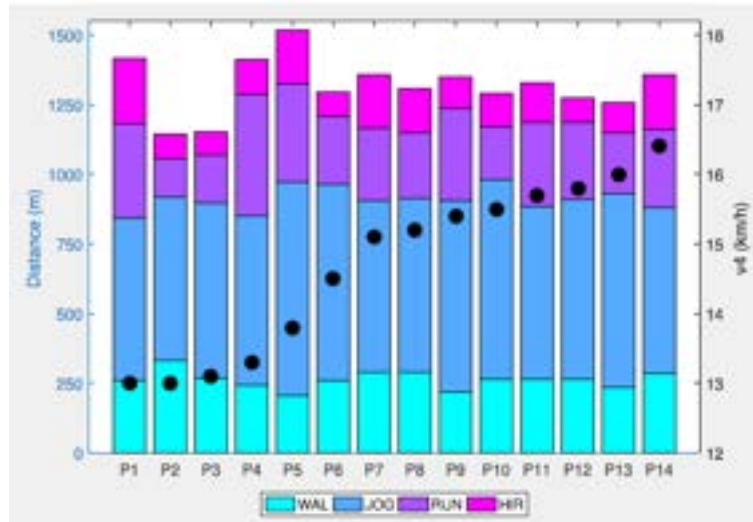


Abb. 22: Zurückgelegte Distanzen in vordefinierten Geschwindigkeitszonen (gestapelte Balken) und Geschwindigkeit bei einer fixierten Blutlaktatkonzentration von 4 mmol L^{-1} (schwarze Punkte) bei 14 männlichen Fußballspielern (P1–P14). WAL, Gehen ($0,0\text{--}7,2 \text{ km/h}$); JOG, Joggen ($> 7,2\text{--}14,4 \text{ km/h}$); RUN, Laufstrecke ($> 14,4\text{--}19,8 \text{ km/h}$); HIR, hochintensive Laufstrecke ($> 19,8 \text{ km/h}$); n_{acc} , Anzahl der Beschleunigungen ($> 1,54 \text{ ms}^{-2}$); $\emptyset\text{HR}$, mittlere Herzfrequenz; HRR, Erholung der Herzfrequenz; v4, Geschwindigkeit bei 4 mmol L^{-1} Laktatschwelle (Reinhardt et al. 2020, S. 5).

Die zentrale und zugleich wertvollste Erkenntnis resultierte aus der korrelationsanalytischen Aufbereitung aller Daten (Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson). Hierbei zeigte sich (Tab. 7) eine sehr hohe Korrelation ($r = -0.91$) zwischen der im „3 gegen 3“ ermittelten Erholungszeit (Abnahme der Herzfrequenz von 90 auf 80%) sowie der Leistung (Laufgeschwindigkeit) an der v4 (Reinhardt et al. 2020).

Tab. 7: Produkt-Moment-Korrelationen (Pearson) bezüglich Belastungs- und Beanspruchungsparametern aus beiden Testsettings. Hohe/relevante Korrelationen ($r > 0.5$) sind fett hervorgehoben. TD-Gesamtstrecke, HR_{v4} Herzfrequenz bei v4, L_{SSGs} Blutlaktatkonzentration nach dem 3 gegen 3 (Reinhardt et al. 2020, S. 6)

	WAL	JOG	RUN	HIR	n_{acc}	$\emptyset\text{HR}$	HRR	v4	HR_{v4}	L_{SSGs}
TD	-,61	,26	,84	,72	,49	-,37	-,05	,03	-,23	,10
WAL		-,69	-,61	-,07	-,62	,08	,08	-,08	,13	-,02
JOG			,02	-,21	,37	,09	-,24	,21	,21	-,19
RUN				,44	,44	-,42	,13	-,07	-,30	,25
HIR					,24	-,21	-,09	-,01	-,32	,02
n_{acc}						-,02	-,53	,60	,11	-,27
$\emptyset\text{HR}$,02	-,07	-,13	,26
HRR								-,91	-,69	,61
v4									,75	-,59
HR_{v4}										-,46



Fazit & Schlussfolgerung

Das sehr häufig im Training verwendete „3 gegen 3“ ist offensichtlich in Verbindung mit dem Laufbandstufentest sehr gut dazu geeignet, die fußballspezifische Erholungsfähigkeit abzubilden. Überdies ist der fußballunspezifische Laufbandstufentest nicht nur hilfreich, die Schwellen (aerob/anaerob) und die daraus resultierenden Trainingsbereiche, insbesondere den GA1-Bereich (Grundlagenausdauertraining), zu berechnen. Vielmehr ist die Geschwindigkeit an der fixen 4 mmol Schwelle offenkundig ein überaus valider Parameter, um standardisiert die Erholungsfähigkeit von professionellen Fußballspielern beurteilen zu können.

Im Unterschied zum FBKT stellt das hier vorgestellte Testdesign der small sided games („3 gegen 3“) ein überaus praktikables Assessment dar, da Training und Test gewissermaßen miteinander verschmelzen. Insofern können dem Trainerteam schnell und kontinuierlich wichtige Informationen zum individuellen Erholungsstatus der Spieler zur Verfügung gestellt werden.

Sollten sich die Ergebnisse in einem Retest bestätigen lassen, so kann u.U. auf eine Laktatanalytik beim „3 gegen 3“ verzichtet werden, was die Praktikabilität und Anwendbarkeit dieses Testdesigns nochmals deutlich erhöhen würde.

Literatur

Reinhardt L., Schulze S., Kurz E., Schwesig R. (2020). Heart rate recovery in small-sided games is strongly related to v4 in soccer players. *Sports Med Open*, 6, 43.

Schwesig R., Hartmann M., Leuchte S., Fischer D., Kuß O. (2013). Validity of complex soccer-specific field test and a non-specific sprint test - Assessments for test and match performance. *Sportverl Sportschad*, 27, 75-84.

Schwesig R., Miserius M., Hermassi S., Delank KS., Noack F., Fieseler G. (2016). How valid is the performance diagnostic in soccer? *Sportverl Sportschad*, 30, 26-30.

Schwesig R., Schulze S., Reinhardt L., Laudner KG., Hermassi S. (2019). Differences in player position running velocity at lactate thresholds among male professional German soccer players. *Front. Physiol.*, 10, 886.



6 Saisonbegleitende Evaluierung leistungsphysiologischer Parameter in der U17

Hintergrund & Zielstellung

Eine validierte Ermüdungs- und Erholtheitsdiagnostik, die überdies noch möglichst ökonomisch, zuverlässig und ohne großen Aufwand betrieben werden kann, stellt nach wie vor ein großes Ziel seitens der Sportwissenschaft und Sportmedizin dar. 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.

Deshalb war es Ziel dieser längsschnittlichen Datenerhebung mit der U17 des HFC, 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. Insbesondere galt es, die Auswirkungen der über den Saisonverlauf kumulativen physischen Belastung sowie die Aussagekraft und Eignung der eingesetzten Diagnostikmethoden zu prüfen.

Der Untersuchung zugrunde lagen folgende Hypothesen:

Hypothese 1: Eine hohe Spielbelastung führt zum Anstieg der Laborparameter CK, CRP, LDH und IGF-1.

Hypothese 2: Eine hohe Spielbelastung zeigt sich in einer verringerten posturalen Stabilität (Prüfinstrumente: Posturographie; Parameter: WDI, ST).

Hypothese 3: Eine hohe Spielbelastung äußert sich in einer verringerten Reaktivkraft (Prüfinstrument: Kraftmessplatte/Drop Jumps; Parameter: Sprunghöhe).

Untersuchungsdesign

Insgesamt wurden 21 Spieler der U17 Fußballmannschaft des Hallescher FC von Juli 2017 bis Juni 2018 für eine Studie zur kumulativen Ermüdung über den Saisonverlauf untersucht. Für jeden Spieler gab es insgesamt vier Messzeitpunkte (MZP; Abb. 23), an denen verschiedene Parameter zur Ermüdungsdiagnostik (Tab. 8) unter ärztlicher Aufsicht in der Sportklinik Halle erhoben worden sind.

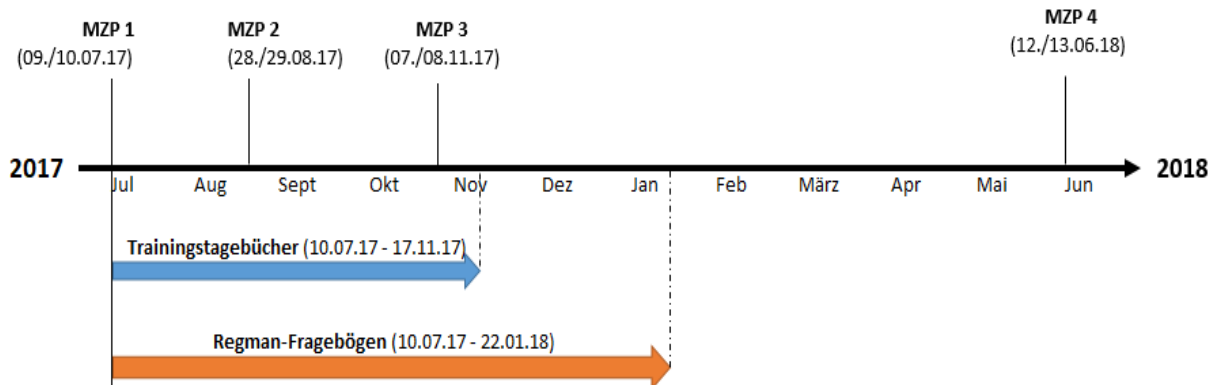


Abb. 23: Überblick über die Untersuchungsplanung bezogen auf die gesamte Saison. Die Datenerhebung begann am 09./10.07.2017 und endete am 12./13.06.2018.

Zur Objektivierung der Belastung wurden die Spiele bilanziert und Einsatzzeiten der Spieler herausgearbeitet. Zusammen mit den Trainingstagebüchern dienten sie als quantitative Belastungsparameter, welche mit den gemessenen leistungsphysiologischen Parametern verglichen werden sollten.

Tab. 8. Chronologische Abfolge der durchgeführten Untersuchungsmethoden und deren Parameter.

Untersuchungsmethode	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	Muskelaktivität (MUAPs)

Die Auswertung der elektromyographischen Daten findet derzeit im Rahmen einer Dissertation statt und kann deshalb noch nicht hier präsentiert werden.

Es wurden ausschließlich Feldspieler in die Studie eingeschlossen, da Torhüter ein deutlich abweichendes Beanspruchungsprofil vorweisen. 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 U17 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. 24).

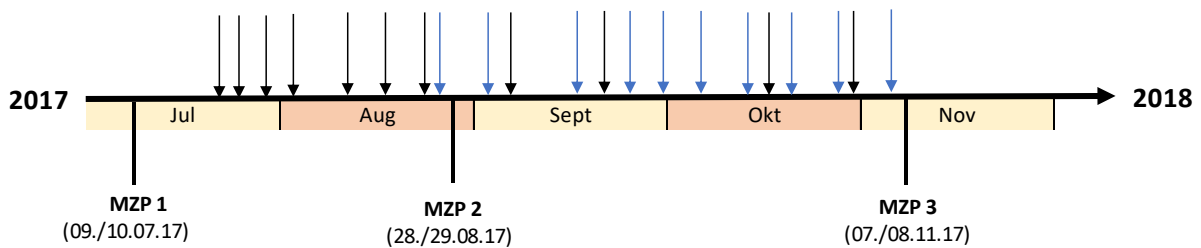


Abb. 24: Spiele (dargestellt als Pfeile) der U17 des HFC zwischen dem 1. und dem 3. MZP; schwarz = Freundschaftsspiel, blau = Regionalligaspiel.

Auf eine dezidierte Beschreibung der verwendeten Assessments wird an dieser Stelle verzichtet, da dies den Rahmen sprengen würde und diese in der Literatur hinlänglich präzise beschrieben sind. Überdies wird dieser Teil der Datenanalyse derzeit in Form einer Dissertation am UKH Halle (Department Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie) bearbeitet.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse komprimiert dargestellt. Hierbei erfolgt eine Beschränkung auf die Laborparameter (CK, CRP, IGF-1, LDH).

Ergebnisse - Laborparameter

Zur Überprüfung der Hypothesen 1 – 3 wurde die kumulative Spielzeit zwischen zwei Messzeitpunkten (= Intervallspielzeit) sowie der letzten acht Tage vor einem MZP (= 8-Tage-Spielzeit) mit den Ermüdungsparametern verglichen. Als Grundlage für die nachfolgende Ergebnisdarstellung wurde daher zunächst die Spielbelastung in der Teilsaison dargestellt (Abb. 25a-b).

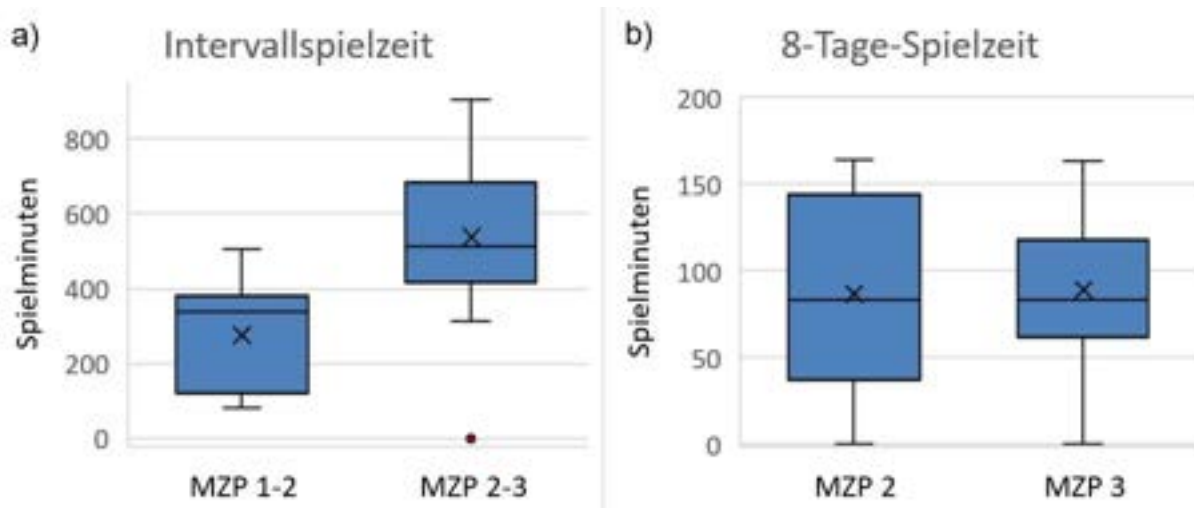


Abb. 25a-b: Kumulative Spielbelastung zwischen zwei MZP (a), bzw. über die letzten acht Tage vor einem MZP (b). Die Spielzeit zwischen MZP 2 und 3 war durchschnittlich höher als zwischen MZP 1 und 2 (a), während die 8-Tage-Spielzeit vor beiden MZP etwa gleich war (b). Der Mittelwert ist mit „x“ markiert, der Median ist als Querlinie innerhalb der Box dargestellt. Ober- und Untergrenze der Boxen entspricht dem 3., bzw. 1. Quartil.

Insgesamt war die Anzahl an 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. 25a). 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 den 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.

Vor Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Laborparametern und Spielbelastung wurde zunächst die Veränderung der Laborwerte über den Saisonverlauf dargestellt. Dazu wurden insbesondere die Medianwerte betrachtet, da die Laborwerte nicht normalverteilt sind. Besonders der CK-Median stieg im Verlauf der Saison an (Abb. 26a). Von MZP 1 zu 2 verdoppelte er sich von 149 auf 286 U/l (+ 92%) und stieg zum MZP 3 auf 397 U/l (+ 266%) an. 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 von MZP 2 und 3 fällt auf, dass der Minimalwert an beiden Messungen etwa gleich ist (ca. 100 U/l), während der Maximalwert zum MZP 3 etwa 300 U/l höher war als zum MZP 2 (979 U/l vs. 658 U/l).

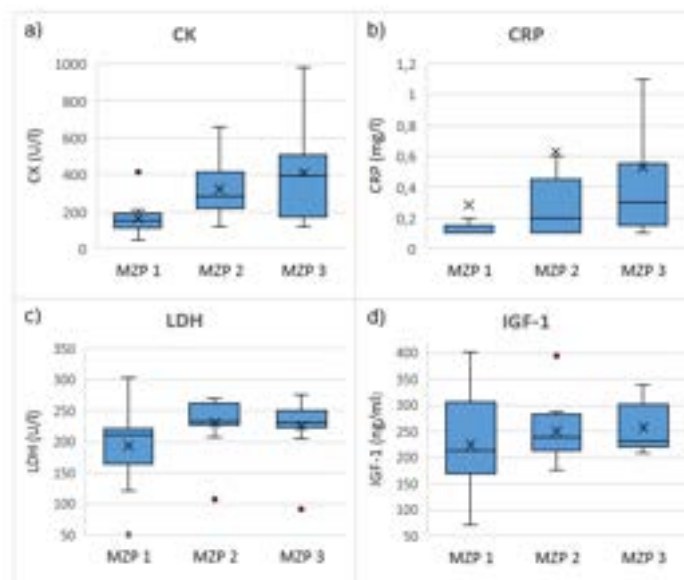


Abb. 26a-d: Laborwertmessungen von CK (a), CRP (b), LDH (c) und IGF-1 (d) zu den MZP 1 bis 3. Median und Mittelwert der CK (a) stiegen im Verlauf stetig an, wobei von MZP 1 – 2 die größte Zunahme zu sehen ist. Der CRP-Median (b) stieg kontinuierlich von MZP 1 bis 3 an. Median und Mittelwert von LDH (c) und IGF-1 (d) zeigen eine leichte Zunahme von MZP 1 zu 2, blieben dann aber zum MZP 3 konstant.

Bei Betrachtung der LDH-Konzentrationen fällt auf, dass das 1. und 3. Quartil von MZP 1 zu 2 deutlich anstieg (Abb. 26c). Die LDH-Mediane zeigten dagegen kaum eine Veränderung über die Saison. Zum MZP 2 hin nahm der Median nur leicht zu (212 auf 232 U/l; +9%), blieb dann aber zum MZP 3 auf gleichem Niveau (231 U/l).

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 etwa auf gleichem Niveau zum MZP 3 (ca. 90 – 270 U/l). Der Mittelwert zeigte einen ähnlichen Verlauf wie der Median.

Der Median von IGF-1 verlief über den gesamten Untersuchungszeitraum relativ konstant (Abb. 26d). Bei genauer Betrachtung sind nur schwache Veränderungen über den Saisonverlauf erkennbar. Zwischen MZP 1 und 2 fand ein Anstieg von 213 auf 239



ng/ml statt (+ 12%), während zum MZP 3 eine minimale Abnahme auf 233 ng/ml (- 3%) zu verzeichnen ist. Der Mittelwert zeigte einen ähnlichen Verlauf wie der Median, wobei zum MZP 3 im Gegensatz zum Median ein leichter Anstieg von 250 auf 257 ng/ml stattfand. Die Streuung ist zum MZP 1 am größten (ca. 70 – 400 ng/ml) und nahm zum MZP 2 und 3 stark ab. Eine deutliche Veränderung des IGF-1-Medians über den Saisonverlauf hat nicht stattgefunden.

Die varianzanalytische Auswertung ergab einen signifikanten Mittelwertanstieg der CK- ($p = 0,004$) und CRP-Konzentration ($p = 0,014$). Die LDH ($p = 0,060$) und der IGF-1 ($p = 0,643$) zeigten keine signifikanten Veränderungen der Mittelwerte über den Saisonverlauf. Die Post-hoc-Tests ergab einen signifikanten Mittelwertanstieg der CK von MZP 1 zu 2 ($p = 0,009$) und von MZP 1 zu 3 ($p = 0,017$). Beim CRP hingegen ließen sich keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den MZP eruieren (Tab. 8). Der Mittelwertunterschied der CK-Konzentration zeigte zu beiden MZP eine mittlere Effektgröße ($0,3 \leq d < 0,5$), während beim CRP jeweils nur schwache Effekte ($0,1 \leq d < 0,3$) zu beobachten waren (Tab. 9).

Tab. 9. Partielle Effekte (d) auf der Basis von Post-hoc-Tests (p)

	CK 1 - 2	CK 1 - 3	CK 2 - 3	CRP 1 - 2	CRP 1 - 3	CRP 2 - 3
p	0,009	0,017	1,0	0,165	0,076	1,0
d	0,38	0,36	0,03	0,25	0,29	0,04

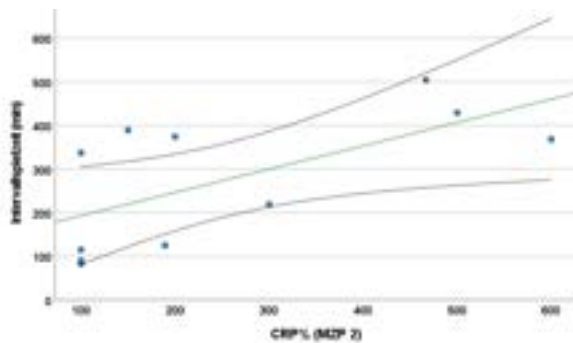
Belastungsabhängige Veränderungen

Zur Überprüfung der 1. Hypothese („Eine hohe Spielbelastung führt zum Anstieg der Laborparameter CK, CRP, LDH und IGF-1“) 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 die Laborwerte prozentual (Bezeichnung: CK%, CRP%, LDH%, IGF-1%) in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus (MZP 1) angegeben.

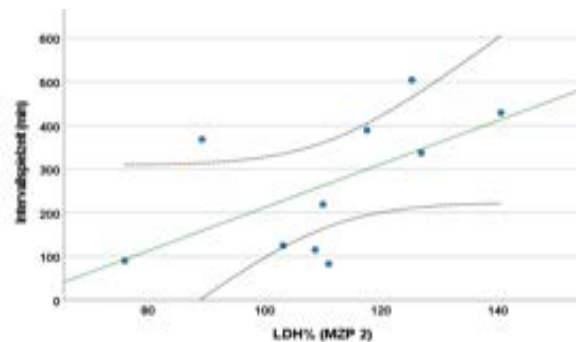
Dadurch sind Aussagen über individuelle Veränderungen der Laborwerte trotz großer Unterschiede in den Absolutwerten möglich. Für den 2. MZP ergab die Korrelationsanalyse nach Pearson relevante positive Korrelationen ($r > 0,5$) zwischen der 1. Intervallspielzeit (MZP 1 – 2) und den Laborparametern CRP% ($r = 0,645$) und LDH% ($r = 0,589$) sowie zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% ($r = 0,783$).

Beim Vergleich der 1. Intervallspielzeit mit CRP% zum MZP 2 zeigten sich große Streuungen um die Trendlinie (Abb. 27a). 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).

a)



b)



c)

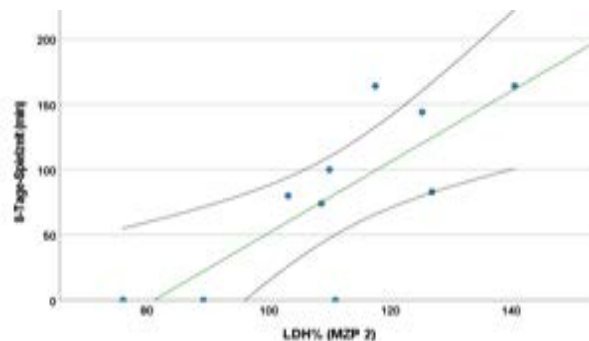


Abb. 27a-c: a) Korrelation ($r = 0,645$) zwischen Intervallspielzeit und CRP% zum MZP 2. b) Korrelation ($r = 0,589$) zwischen Intervallspielzeit und LDH% zum MZP 2. Die LDH-Werte lagen bei ca. 80 – 140% des Ausgangsniveaus und zeigten damit eine weniger starke Veränderung als das CRP. c) Korrelation ($r = 0,783$) zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% zum MZP 2.

Ebenso zwischen der 1. Intervallspielzeit und LDH% zum MZP 2 zeigt sich eine große Streuung um die Trendlinie mit vier von zehn Werten außerhalb des 95% Konfidenzintervalls (Abb. 27b). 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.

Zwischen LDH% und der 8-Tage-Spielzeit zum MZP 2 bestand die größte Korrelation ($r = 0,783$; Abb. 27c). Die Streuung ist hier insgesamt geringer und es befinden 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 ergab 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) hatten LDH-Werte in einem Bereich von ca. 120 – 140% des Ausgangsniveaus.



Abschließend sei bemerkt, dass zum MZP 3 für CRP% und LDH% lediglich mittlere positiven Korrelationen mit der Intervallspielzeit festgestellt werden konnten ($r_{\text{CRP}} = 0,381$ bzw. $r_{\text{LDH}} = 0,336$), weshalb auf eine graphische Darstellung verzichtet wurde. Zwischen der 8-Tage-Spielzeit und LDH% zum MZP 3 war dagegen keine Beziehung erkennbar ($r_{\text{LDH}} = 0,016$).

Fazit & Schlussfolgerung

Abseits der inhaltlichen Erkenntnisse sei zunächst hervorgehoben, dass es möglich war, eine so umfangreiche und komplexe Datenerhebung innerhalb der Saison der U17 des HFC durchzuführen. Dies ist ein Beleg für die konstruktive und innovative Herangehensweise seitens des Nachwuchsleistungszentrums des HFC.

Es ergaben sich relevante Korrelationen ($r > 0,5$) zwischen der Intervallspielzeit und CRP% ($r = 0,645$) sowie LDH% ($r = 0,589$) zum MZP 2. LDH% korrelierte zudem positiv mit der 8-Tage-Spielzeit zum MZP 2 ($r = 0,783$). Zum MZP 3 gab es relevante positive Korrelationen zwischen der Intervallspielzeit und den Drop Jumps beidbeinig ($r = 0,544$) sowie den Drop Jumps links ($r = 0,602$). Auch zeigte sich zum MZP 3 eine hohe positive Korrelation zwischen der 8-Tage-Spielzeit und den Drop Jumps beidbeinig ($r = 0,706$). Die Laborparameter CK und IGF-1 sowie die posturale Stabilität zeigten keinen Zusammenhang mit der Spielbelastung. Weder Laborparameter, noch Reaktivkraft oder posturale Stabilität scheinen die Spielbelastung zuverlässig widerzuspiegeln. Gewisse Zusammenhänge sind zwar erkennbar, eine genaue Validierung sollte jedoch erfolgen.

Auch im Lichte dieser Ergebnisse findet seit Juni 2021 ein engmaschiges (dreimal pro Woche) Monitoring der CK-Werte innerhalb des Drittligateams des HFC statt (Kapitel 3). Dies ist kombiniert mit der Erfassung der Spieldaten (z. B. Laufdistanz, Sprints, Beschleunigungen) sowie der subjektiv wahrgenommenen Beanspruchung (Borgskala), um einerseits die Laufleistung der Spieler objektiv beurteilen sowie das Training individuell steuern zu können.

Darüber hinaus forschen die Sportklinik Halle und das Labor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin derzeit in einem Verbundprojekt mit weiteren Partnern (GAMPT mbH Gesellschaft für Angewandte Medizinische Physik und Technik, NH DyeAGNOSTICS GmbH, Hochschule Merseburg Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften) an neuen Lösungen. U.U. ist es möglich, auf Ultraschallebene (Scherwellengeschwindigkeit) oder/und mittels Proteinbiomarkeranalyse die Diagnostik von Ermüdung und Erholtheit substantiell zu qualifizieren.



7 Einsatz des dEMG im Rahmen der RTC-Testung vorderes Kreuzband (Bartels et al. bisher unveröffentlichte Ergebnisse)

2016 führten wir gemeinsam mit 4 weiteren Einrichtungen im Auftrag der VBG die Pilotimplementierung zur Validierung eines RTC Assessment Tools nach vorderer Kreuzbandoperation durch. Darüber hinaus sind die im Folgenden vorgestellten Inhalte Ergebnisse eines Forschungsprojektes (Titel: Optimierung der Steuerung des Mikrozyklus in der spätrehabilitativen Phase nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion als Beitrag zur Gewährleistung einer sicheren Rückkehr zum Freizeitsport sowie zur Vermeidung von Re-Rupturen) mit der Firma Dögel GmbH (Kabelsketal), welches von der Investitionsbank Sachsen Anhalt (Förderprogramm: Digital Creativity Projekt zur Gestaltung des digitalen Wandels in Sachsen-Anhalt) und der Europäischen Union gefördert wurde.

Von bisher 61 VBG-RTC Testungen an ausrehabilitierten VKB operierten Sportler haben 57% den Test bei uns nicht bestanden. Hinzu kommt, dass diejenigen Leistungssportler, die in anderen Rehabilitationseinrichtungen bereits „grünes Licht“ im RTC Test bekamen und aufgrund von Problemen in der Wiedereingliederung zum Sport bei uns vorstellig wurden, bei uns den Test fast ausschließlich nicht bestanden. Diese Sportler bestanden dann in Folge 4-6wöchiger individueller Trainingsanleitung den Test.

In den letzten Jahren wurden bedeutende Fortschritte in der postoperativen Rehabilitation und der Identifizierung von Risikofaktoren für eine zweite vordere Kreuzband (VKB) Verletzung erzielt. Dies führte jedoch nicht zu einer Verringerung des sekundären VKB-Verletzungsrisikos. Wir vertreten die Auffassung, dass man durch die elektrophysiologische Betrachtung der einzelnen motorischen Einheiten einen tieferen Einblick bezüglich der abgelaufenen Neuroplastizität und Adaptationsprozesse nach VKB Rekonstruktion gewinnen kann, als mit ausnahmslos kinematischen Parametern. Neben der anatomischen sollte vor allem die funktionelle Stabilität eine grundlegende Voraussetzung für die Rückkehr zum Sport nach VKB Rekonstruktion sein.

Hintergrund - Diagnostik der Muskelaktivierung im Rehabilitationsverlauf nach VKB-Rekonstruktion

Nach der Verletzung des vorderen Kreuzbandes (VKB) sind somit zwei Faktoren zu beurteilen. Erstens die Insuffizienz der Aktivierung des schnellen Motoneuronenpools, die das Defizit an Maximal- und Schnellkraft bedingt und zu einer „falsch positiven“ Ermüdungsresistenz führt. Zweitens die Ermüdung der muskulären Ansteuerung, des common drive. Der diagnostische Zugang ist die Analyse des EMG. Es sind relevante Parameter zu extrahieren, welche die Innervation und Ermüdung im Belastungs-Erholungs-Zyklus des Therapietrainings widerspiegeln und Informationen für die Belastungsgestaltung liefern. Im Rahmen eines Digital Creativity Projektes entwickelten wir eine Software, die es uns ermöglicht, den Ermüdungsstatus nach hochreaktiven Trainingseinheiten im Rahmen der Rehabilitation nach VKB Rekonstruktion zu bestimmen.

Material und Methoden

Der Muskelus quadriceps femoris wird als Repräsentant des sensomotorischen Systems (SMS) in einer standardisierten Körperposition (spezieller Stuhl, Oberkörper aufrecht fixiert, Hüft- und Kniegelenk 90°, Ankopplung Kraftsensor Höhe Sprunggelenk

in 90° zur Unterschenkel-Achse) untersucht (Abb. 28). Das EMG wird nach standardisierter Vorbereitung und Platzierung der Elektroden (Hermens 1999) vom M. vast. med. und lat. abgeleitet (Fa. Delsys, Bagnoli 16-channel Desktop System, Delsys, Inc., Natic, MA, USA). Das isometrische Testprogramm, entwickelt für Leistungssportler (Fußball), besteht aus maximalen und submaximalen Kontraktionen (3 maximalen Kontraktionen (MVC) von 3 Sekunden (Sek.), Pause 20 Sek.; feedbackgeführt: 40% und 80% MVC über 20 Sek., Pause 60 Sek.; MVC 3 Sek. zur Kontrolle; feedbackgeführt: 6 Kontraktionen mit 60% MVC über je 60 Sek.; Pause: 60 Sek.; erneut 40% und 80% MVC über 20 Sek.). Eine spezielle Software dekomponiert das EMG (Abb. 28). Hierbei werden die aktivierten motorischen Einheiten (ME) mit ihren Parametern Rekrutierungsschwelle (RT), Entladungsrate (ER), Amplitude des Muskelaktionspotenzials (MUAP) und ermüdungsrelevante Veränderungen ermittelt.

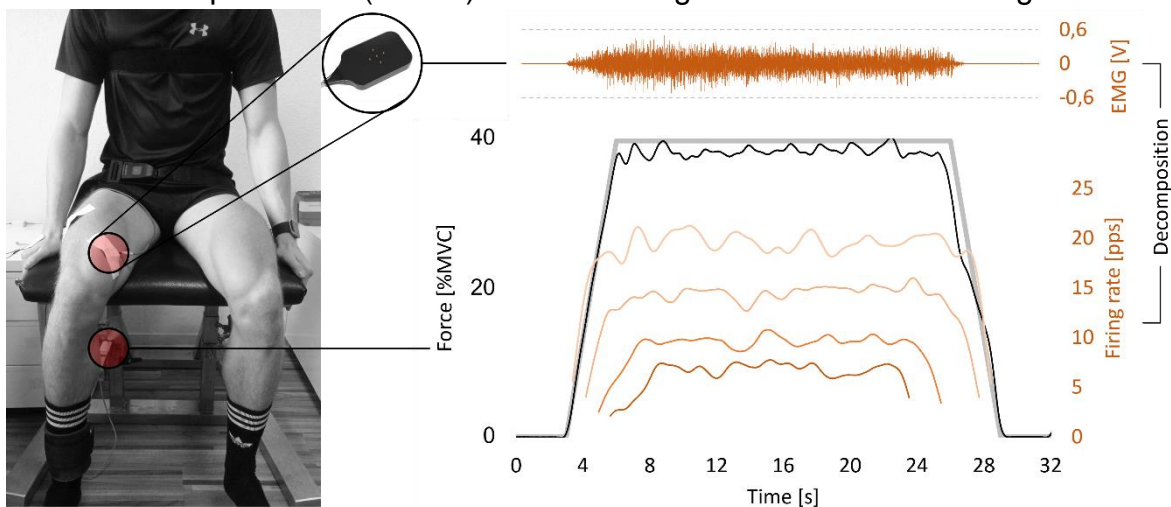


Abb. 28: Darstellung des Messplatzes, der Kraft- und EMG-Sensorik sowie ein Beispielprotokoll der Erfassung und Dekomposition der elektromyographischen Signale.

Der MVC-Wert, für die submaximalen Kontraktionen die prozentuale Abweichung von der Vorgabe, werden als compliance error (CE) berechnet. 9 Parameter (MVC, CE, Anzahl der motorischen Einheiten (ME), $RT_{min.}$, $RT_{max.}$, RT-Bereich, mittl. ER, MUAP) gehen wegen ihrer differenten Aussagekraft mit einer Gewichtung (40%: $F_{max.}$; 10%: Rekrutierungsbereich, R^2 der ME-Detektierung, MUAP-Amplitude, mittlere ER; 5%: Anzahl detektierter MU, CE, minimale und maximale Rekrutierungsschwelle) in die Beurteilung ein. Dabei werden die Daten für den erhaltenen Zustand mit denen nach den Belastungen im Mikrozyklus verglichen. Hieraus leitet sich eine Empfehlung für die voraussichtliche Verträglichkeit hoch intensiver Belastungen ab.

Trainingsempfehlung

Es stellte sich heraus, dass eine sehr hohe interindividuelle Variabilität der Veränderungen der Parameter auf das Training zu verzeichnen ist. Entsprechend sind keine statistischen Gruppenwerte der Parameter als „Norm- oder Referenzwerte“ ermittelt worden, sondern es erfolgt stets ein tagesspezifischer Vergleich für jeden Patienten. Für die Bewertung „noch bestehende Ermüdung“ wurde für jeden Parameter eine Änderung zum Ausgangswert von 10% als Schwellenwert festgelegt. Werte über 10% Abweichung deuten auf eine noch vorhandene Ermüdung hin. Für die Empfehlung „hoch intensives Training kann mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem gewünschten Trainingseffekt und ohne Wiederverletzung erneut ausgeführt werden“



müssen die meisten Parameter im 10-%-Niveau liegen. Tabelle 10 zeigt exemplarisch ein negatives Ergebnis.

Von den 9 Parametern weisen 8 eine z. T. deutlich größere Abweichung gegenüber den Werten im erholten Zustand auf. Regenerative Belastungen müssen weitergeführt werden. Aktuell sollten keine erneuten intensiven Belastungen durchgeführt werden.

Tab. 10: Übersicht der einzelnen Parameter der Muskelaktivität mit Interpretation sowie ein Beispiel nach intensiven Trainingsbelastungen verglichen mit den Werten im erholten Zustand.

Parameter	Bedeutung	Änderung [%] OP-Bein	Änderung [%] Nicht-OP-Bein
MVC	willkürliche isometrische Maximalkraft des M. quadriceps femoris	-11,3	1,7
CE (compliance error)	relative Abweichung von der Intensitätsvorgabe (Kraftkurve)	-18,0	20,3
Anzahl der motorischen Einheiten	Menge der identifizierten motorischen Einheiten	-31,3	93,3
Minimale Rekrutierungsschwelle	Intensität, der ersten identifizierten motorischen Einheit	696	24,0
Maximale Rekrutierungsschwelle	Intensität, der letzten identifizierten motorischen Einheit	171	7,1
Rekrutierungsbereich	Differenz zwischen maximaler und minimaler Rekrutierungsschwelle; Spannweite der neuromuskulären Aktivierung	144	-9,0
FR (mittlere Entladungsrate)	Durchschnittswert der mittleren Feuerrate der identifizierten motorischen Einheiten	-29,7	-5,4
MUAP-Amplitude	maximale Amplitude des Aktionspotenzials der identifizierten motorischen Einheit; Intensität der Aktivierung	104	-1,6
Bestimmtheitsmaß (R ²)	Varianzaufklärung der linearen Regression zwischen der mittleren Entladungsrate und der jeweiligen Rekrutierungsschwelle aller identifizierter motorischer Einheiten; Maß der Abstimmung des neuromuskulären Systems während der Krafterzeugung	-11,3	1,7

VKB-Ruptur: Strukturveränderung des sensomotorischen Systems

Die Gelenkkapseln, die Bänder, die myo-tendinösen Übergangsbereiche und die Fasziennetze (s. Biotensigrität) sind sehr wichtige Standorte von Mechanosensoren als Bestandteile des SMS. Ihre Informationen liefern essentielle Informationen für die Regulation der Körperhaltung, -stellung und für alle Bewegungen. Die Afferenzen aus dem vorderen Kreuzband (VKB) bestimmen darüber hinaus die volle Aktivierungsfähigkeit des M. quadriceps femoris (Laube 2009; Laube 2020). Fallen diese Informationsquellen infolge Verletzung, Gelenkdegeneration oder auch des Alterungsprozesses ständig aus, ist auch die Funktion des SMS dauerhaft verändert. So sind die nahezu umgehende Atrophie und das ausgeprägte Funktionsdefizit des M. quadriceps femoris infolge der Ruptur einer akuten funktionellen Teilparese geschuldet (Laube et al. 1998; Laube 2009), die durch das Bewegungslernen in der Rehabilitation



gemindert werden muss. Es bleibt aber auch nach Jahren in der Muskelansteuerung ein Defizit (Laube 2009), wodurch:

1. die frühe Verletzungs- und Re-Rupturanfälligkeit um 3-13% erhöht ist (Myklbust 2005),
2. Webster et al. (2014) zufolge die Re-Rupturrate bei unter 20-Jährigen sogar um den Faktor 3-6 höher liegt und
3. im 10-Jahres-Follow up 23-27% der Operierten erneut eine VKB-Verletzung erleiden (Morgan et al. 2016).

Die Rückkehr zur ursprünglichen sportlichen Leistungsfähigkeit bzw. Trainierbarkeit gelingt in der Regel nur 65–83% der Sportler (Lai et al. 2018). National wie international zeigt sich eine sehr hohe Variabilität und mangelnde Standardisierung der Bewertungen zugunsten der Rückkehr zum Sport (Marom et al. 2021).

Schwerpunkt: sensomotorisches Training in der Rehabilitation

In der Rehabilitation gilt es, den Strukturschaden zu kompensieren. Mittels struktureller und funktioneller Adaptationen im Rückenmark und supraspinal infolge eines schnelligkeitsorientierten Lerntrainings gilt es, die Funktion des SMS der ursprünglichen Form wieder anzunähern. Da die funktionelle Teilparese nach einer VKB-Ruptur den schnellen Anteil des Motoneuronenpools betrifft (Laube 2009), ist schnelligkeits- und schnellkraftorientiertes Training ein gut begründetes Element. Bei explosiven Kontraktionen (M. tibialis anterior) bestimmen die Geschwindigkeit der Rekrutierung des Motoneuronenpools und die maximalen Entladungsraten der Motoneuronen den Kraftanstieg. Ein charakteristisches Merkmal solcher Kontraktionen ist, dass die Rekrutierung mit einem extrem kurzen Entladungsburst mit Frequenzen bis zu 200 Hz gestartet wird, der der Kraftgenerierung vorausgeht und dann schnell abklingt (Del Vecchio et al. 2019). Obwohl absolut indiziert führt aber ein solches Training bei zu hoher Progredienz zu Problemen der Belastbarkeit der Bindegewebestrukturen.

Ein Nachbehandlungsprogramm inklusive Schnelligkeitstraining ist auch bisher ohne evidenzbasierte Empfehlungen (Cavanaugh und Powers 2017). Der Zyklus Belastung – Adaptation (Laube 2009; Laube 2020) ist unter diesem Gesichtspunkt noch gar nicht untersucht. McLean und Samorezov (2009) belegten, dass die Biomechanik von Landungen durch einen zentralen Ermüdungsmechanismus gesteuert ist. Pincheira et al. (2018) zufolge ist eine unerwartete Landung im ermüdeten Zustand ein Worst-Case-Szenario für berührungslose VKB-Verletzungen.

Sensomotorisches RE-Lerntraining – Intervention der ersten Wahl

Die verletzungsbedingten Funktionsdefizite sind die absolute Domäne des sensomotorischen Lern- und weniger des Krafttrainings, weil die neurophysiologischen Funktionsstörungen im Vordergrund stehen. Die Afferenzen aus dem VKB aktivieren die γ -Motoneuronen und sorgen erst damit über den Eigenreflexmechanismus für die vollständige Rekrutierung des FTF-Pools. Bleiben diese Afferenzen aus wird die Rekrutierungsordnung (Gregory et al. 2004) verändert. Das SMS lernt mit der „verletzungsbedingten neuen Struktur“ implizit und es entsteht eine „neue lernbedingte Struktur“ auf spinaler und supraspinaler Ebene (Laube 2009). Die „Prägung der neuen Struktur“ muss aktiv therapeutisch immer mehr in den Fokus rücken (Hewett et al. 2013).



Maximalkraft ungenügender Parameter für den Rehabilitationsverlauf

Es ist die vorrangige Praxis, dass die Patienten rehabilitativ nicht mehr betreut werden, wenn die Maximalkraft des M. quadriceps femoris kaum oder nicht mehr von der operierten Seite abweicht. Dieses Ergebnis basiert auf der Tatsache, dass der rekrutierungsfähige Anteil des Muskels entsprechend trainiert werden kann. Die Maximalkraft ist aber allein ein ungenügender Parameter für die Einschätzung eines ausreichenden Rehabilitationsergebnisses, denn sie liefert nur teilweise eine Aussage zur Geschwindigkeit des Kraftanstiegs, also der Schnellkraft. Letztere ist aber sowohl für die sportliche Leistung als auch für die schnelle aktive Stabilisation der Gelenkkette erforderlich. Die Schnellkraft ist somit primär eine koordinativ und nur sekundär eine maximalkraftgestützte Funktion und insbesondere für die Verletzungsprophylaxe entscheidend.

In der Rehabilitation wird aber die Muskelleistung für die schnelligkeits- und schnellkraftbasierte Gelenkstabilisierung ungenügend beachtet. Eine Ursache ist, dass ein Training der reaktiven Kraft- und der Schnellkraftfähigkeiten eine hohe Verletzungsgefährdung in sich birgt und die trainingsmethodische Vorbereitung aufwändig ist. Im Hinblick auf die Entstehung einer Ruptur des vorderen Kreuzbandes sind vor allem ballistische Bewegungsmuster kennzeichnend (Escamilla et al. 2012). Dufek und Bates (1991) stellten fest, dass grenzwertige Kraftspitzen am Bandapparat innerhalb von 50 ms entstehen.

Für rehabilitative Programme gibt es keine Evidenzen, dass verbesserte koordinative Leistungen primär auf propriozeptive Veränderungen zurückgeführt werden können (Haas et al. 2007). Daher ist ihr verletzungspräventiver Wert begrenzt. Belastungen mit Perturbationstraining und Reaktionszeiten unter 200 ms sind somit in der Prävention als auch der späteren Rehabilitation besser geeignet, um Nicht-Kontakt-Verletzungen zu vermeiden (Bartels et al. 2016; Gokeker et al. 2019). Dennoch stellt ein solches Training mit sehr kurzen Reaktionszeiten im Rehabilitationsverlauf nach VKB-Rekonstruktion eine sehr große Herausforderung dar, denn die prozessualen Anforderungen an den Trainingsprozess sind immens hoch. Wettkampfhähnliche Bedingungen werden simuliert. Das ungenügende Wissen um den Erholungszustand ist problematisch, denn auch im gesunden Zustand ist koordinatives Training weitestgehend nur im nicht ermüdeten Zustand effektiv. Mit der Ableitung von Empfehlungen für ein solches Training aus der Diagnostik der muskulären Ansteuerung sollte eine Lücke geschlossen werden können.

Schlussfolgerungen

Für ein Training der Schnellkraft sind die schnelle Aktivierungsfähigkeit des Muskels und die korrekte Regulation der Bewegung des Kniegelenkes wesentlich. Mit der entwickelten Software kann der Funktionszustand der motorischen Einheiten des Muskulus quadriceps femoris objektiviert und eine Überlastung bei hochreaktivem Perturbationstraining im Rahmen der spätrehabilitativen Phase nach VKB-Rekonstruktion vermieden werden. Durch eine Ampel wird das Ergebnis visualisiert. Eine optimale Vorbereitung auf die sportlichen Anforderungen im Wettkampfsport wird somit geschaffen.

Literatur

Bartels T., Proeger S., Brehme K., et al. (2016). The SpeedCourt system in rehabilitation after reconstruction surgery of the anterior cruciate ligament (ACL). *Arch. Orthop. Trauma Surg.*, 136, 957–966.



- Bartels T., Brehme K., Pyschik M., et al. (2018). Pre- and postoperative postural regulation following anterior cruciate ligament reconstruction. *J. Exerc. Rehabil.*, 14, 143–151.
- Cavanaugh J.T., Powers M. (2017). ACL rehabilitation progression: where are we now? *Curr. Rev. Musculoskelet. Med.*, 10, 289–296.
- Del Vecchio A., Negro F., Holobar A., et al. (2019) You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans. *J. Physiol.*, 597, 2445–2456.
- Dufek J.S., Bates B.T. (1991). Biomechanical factors associated with injury during landing in jump sports. *Sports Med.*, 12, 326–37.
- Escamilla R.F., Macleod T.D., Wilk K.E., et al. (2012). Anterior cruciate ligament strain and tensile forces for weight-bearing and non-weight-bearing exercises: a guide to exercise selection. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 42, 208–220.
- Gokeler A., Neuhaus D., Benjaminse A., et al. (2019). Principles of Motor Learning to Support Neuroplasticity After ACL Injury: Implications for Optimizing Performance and Reducing Risk of Second ACL Injury. *Sports Med.*, 49, 853–865.
- Gregory J.E., Morgan D.L., Proske U. (2004). Responses of muscle spindles following a series of eccentric contractions. *Exp. Brain. Res.*, 157, 234–240.
- Haas C.T., Schulze-Cleven K., Turbanski S. et al. (2007). Zur Interaktion koordinativer und propriozeptiver Leistungen. *Dtsch. Z. Sportmed.*, 58, 19–24.
- Hermens H.J. (1999). European Recommendations for Surface ElectroMyoGraphy: Results of the Seniam project (SENIAM). Roessingh Research and Development. ISBN 90-75452-15-2.
- Hewett T.E., Di Stasi S.L., Myer G.D. (2013). Current concepts for injury prevention in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am. J. Sports Med.*, 41, 216–224.
- Lai C.C.H., Ardern C.L., Feller J.A., et al. (2018). Eighty-three per cent of elite athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br. J. Sports Med.*, 52, 128–138.
- Laube W. (2009). Physiologie des Zyklus Belastung – Beanspruchung – Ermüdung – Erholung – Adaptation. In: Laube W (Hrsg.): *Sensomotorisches System*. Thieme, Stuttgart – New York, 499–555.
- Laube W. (2020). Schmerz, Zyklus Belastung – Adaptation und Gesundheitstraining. In: *Sensomotorik und Schmerz*. Springer, Berlin – Heidelberg, 319–334.
- Luc B., Gribble P.A., Pietrosimone B.G. (2014). Osteoarthritis prevalence following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and numbers-needed-to-treat analysis. *J. Athl. Train.* 49, 806–19.
- Marom N., Xiang W., Wolfe I., et al. (2021). High variability and lack of standardization in the evaluation of return to sport after ACL reconstruction: a systematic review. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* [online ahead of print].
- McLean S.G., Samorezov J.E. (2009). Fatigue-induced ACL injury risk stems from a degradation in central control. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 41, 1661–72.
- Morgan M.D., Salmon L.J., Waller A., et al. (2016). Fifteen-year survival of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction in patients aged 18 years and younger. *Am. J. Sports Med.*, 44, 384–92.
- Myklebust G., Bahr R. (2005). Return to play guidelines after anterior cruciate ligament surgery. *Br. J. Sports Med.*, 39, 127–131.
- Pincheira P.A., Silvestre R., Armijo-Olivo S., et al. (2018). Ankle perturbation generates bilateral alteration of knee muscle onset times after unilateral anterior cruciate ligament reconstruction. *Peer J.* 31, 6:e5310.
- Webster K.E., Feller J.A., Leigh W.B., et al. (2014). Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am. J. Sports Med.*, 42, 641–647.

8 Entwicklung eines komplexen biomechanischen Messplatzes für die VKB-RTC-Testung

Hintergrund

In enger Abstimmung mit der Firma STRADIS entwickelten die Antragssteller in den Jahren 2017 bis 2020 einen komplexen biomechanischen Messplatz zur Beurteilung der Kniegelenkbelastbarkeit für die Wiederaufnahme der beruflichen und sportlichen Aktivität nach Operation des VKB. Durch die Anforderungen an die praktische Umsetzung motiviert, stand die Praktikabilität und die Multimodalität der zu erfassenden Parameter im Vordergrund.

Das erste Jahrzehnt der webbasierten Überwachung von Sportverletzungen (Platt et al. 2021) ergab anhand von explorativen Analysen, dass die Beziehung zwischen Trainingsbelastung und Verletzungsrisiko zunehmend nicht linear bewertet werden sollte (Bache-Mathiesen et al. 2021). Prädiktive Modelle sollten demnach aus einem unvollständigen Verständnis der Determinanten von Verletzungen und ihres Verhaltens in einem komplexen System abgeleitet werden. Anstatt sich auf Risikofaktoren und -assoziationen zu konzentrieren, beginnen wir nunmehr zu verstehen, dass Sportler als dynamische Systeme beschreibbar sind. Das maschinelle Lernen und der Einsatz künstlicher Intelligenz werden dabei zunehmend Bedeutung erlangen (Seshadri et al. 2021). Diese Komplexität und Individualität relevanter Faktoren wird in Abbildung 29 beispielhaft an VKB-Verletzungen von Athleten aus unterschiedlichen Sportarten verdeutlicht.

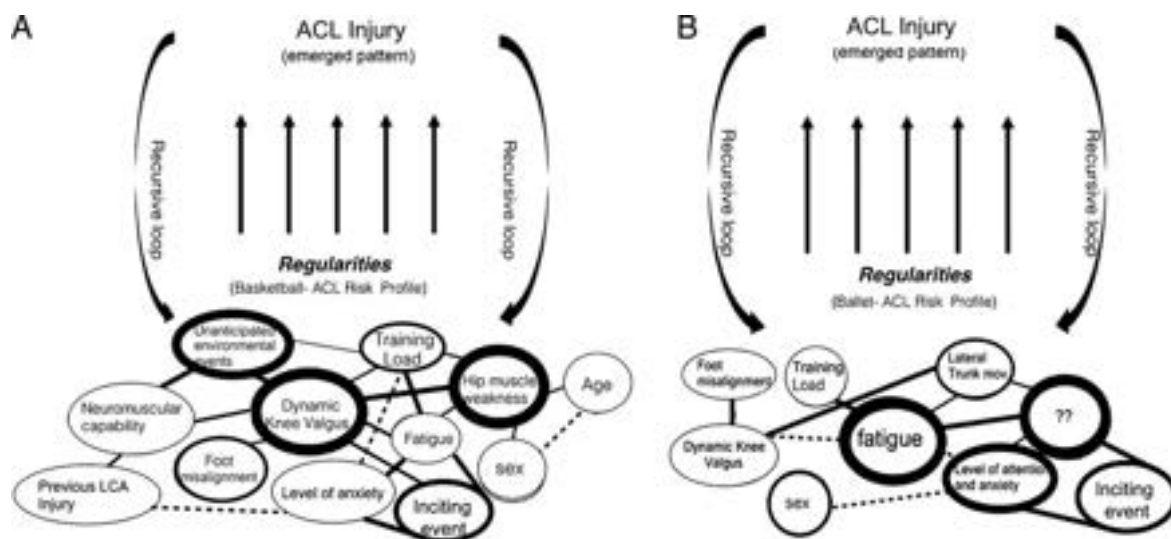


Abb. 29: Exemplarische Wichtung relevanter Einflussfaktoren, die eine Verletzung des VKB begünstigen (Bittencourt et al. 2016).

Neuere Forschungen haben ergeben, dass RTC-Metriken aus der Leistung (z. B. maximale Laufgeschwindigkeit) vor einer Verletzung erweitert werden müssen (Whiteley et al. 2020). Es ist wenig darüber bekannt, welche funktionellen Parameter während der Rehabilitation am wichtigsten zu überwachen sind. Zukünftige Studien werden vermutlich eher auf nicht lineare Algorithmen der individuellen Bewertungen abzielen.

Die Rehabilitation nach einer VKB-Rekonstruktion umfasst derzeit eine umfassende Physiotherapie, die 1–4 Wochen nach der Operation beginnt, sowie einen allgemeinen Konsens über einen Zeitraum von 9 Monaten vor der Rückkehr zum Sport (Zaffagnini

et al. 2015). Die meisten Sportmediziner verwenden unterschiedliche körperliche Einschätzungen des Athleten, um die Bereitschaft zur Wiederaufnahme des Wettkampfsports zu bestimmen. Dennoch bleiben die Wiederverletzungsraten hoch, was darauf hindeutet, dass eine Lücke zwischen der wahrgenommenen und der tatsächlichen Sportbereitschaft der Athleten besteht.

Die Wirksamkeit von RTC-Praktiken nach Kreuzbandrissen von 2010 bis 2013 in der NFL zeigte, dass 19% der Spieler, die nach einer Verletzung zurückkehrten, eine erneute Verletzung des Transplantats oder des kontralateralen Beins erlitten (Dodson et al. 2016). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass aktuelle RTC-Protokolle durch robustere quantitative Bewertungen der Sportlerbereitschaft ergänzt werden sollten, um den Tag der Rückkehr des Sportlers in den Wettkampf besser zu individualisieren (Losciale et al. 2018). Trotz „aggressiver“ Rehabilitationsprogramme, die auf die Verbesserung der Quadrizepsfunktion abzielen, ist ein universell wirksamer Ansatz zur Umkehrung dieser Schwäche nicht vollständig aufgeklärt.

Ergebnisse & Idee

Aufgrund der Limitationen verschiedener Einzelverfahren wurde ein multiparametrischer Messplatz entwickelt (Abb. 30). Der vollumfängliche Messplatz umfasst die videometrische Erfassung und Bewertung von Bewegungen aus drei Perspektiven (*Kinematik*), eine Messplattform zur Bestimmung der orts aufgelösten Druckverteilung (*Dynamometrie*) und ein System zur Registrierung der Muskelaktivität an der Hautoberfläche (*Elektromyographie*).

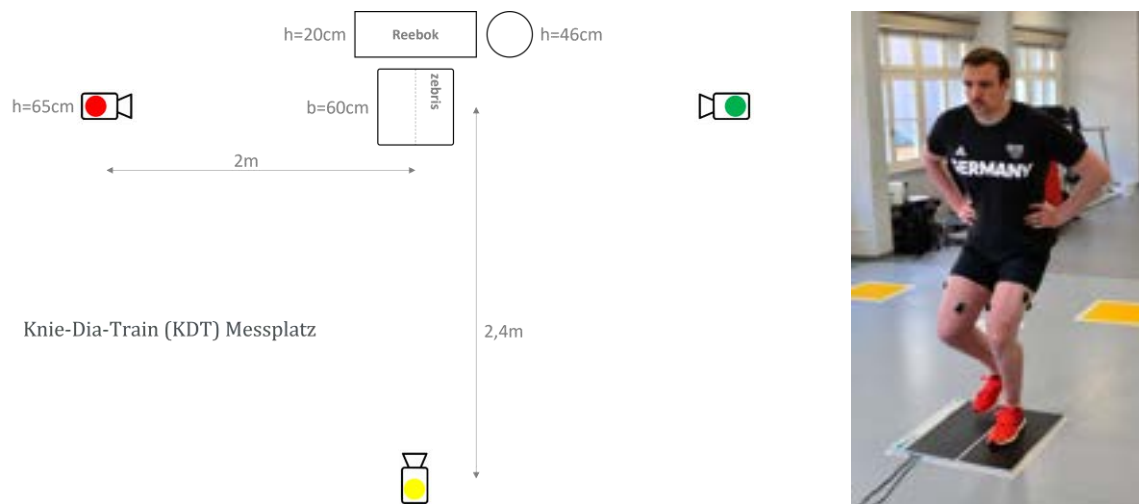


Abb. 30: Maßstabgetreuer Grundriss des Messplatzes sowie Positionierung der EMG-Sensoren bzw. der Marker für die Videoanalyse an einem Probanden.

Die situationsangepasste Kontrolle der Position und Bewegung des Kniegelenks hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Um belastbare Aussagen bezüglich der Funktion des Kniegelenks formulieren zu können, bedarf es zunächst einer Umgebung, in der die Zielaktivitäten und entsprechende Belastungsintensitäten der Personen standardisiert simuliert werden. Dabei müssen Leistungsniveau und Anforderungsprofil bekannt sein. Entsprechend können die Testanforderungen an die Ziele der Patienten angepasst werden. Die erarbeitete Testbatterie ist insbesondere durch die Kategorisierung in verschiedene Aktivitätslevel gekennzeichnet. Je nach beruflicher bzw. sportiver Anforderung werden drei Kategorien von Belastungen unterschieden. Somit werden Tests für Personen ohne sportiven Hintergrund (Alltagsbewegungen), für mehr oder weniger ambitionierte Freizeitsportler sowie Athleten aus dem Leistungssport angeboten. Eine Übersicht der aktuell durchgeführten Tests in den Kategorien sind in Abbildung 31 enthalten:

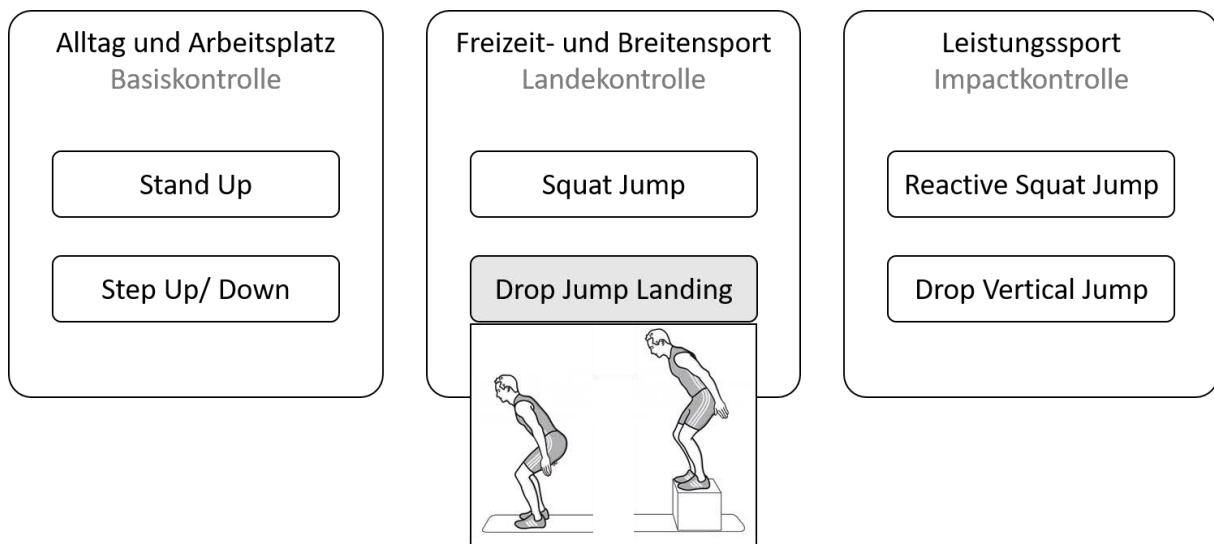


Abb. 31: Auswahl und Kategorisierung der verwendeten Tests mit einem Beispiel.

Während es bei den Alltagsbewegungen darum geht, Kontrolle während „Platzwechsel“ zu demonstrieren, widmen sich die sportiven Kategorien verschiedenen Sprungformen. Hierbei steht zunächst die Landekontrolle im Fokus. Bei Leistungssportlern, insbesondere Sportsportlern, geht es um die Toleranz wiederholter und reaktiver Bewegungen.

Exemplarisch ist die Testanforderung „Trepp-Absteigen auf das linke Bein“ hinsichtlich des Unterschenkel-Bodenwinkels, der Druckverteilung unter der Fußsohle und der Muskelaktivität in den Abbildungen 32, 33 und 34 dargestellt.

Unterschenkel-Bodenwinkel

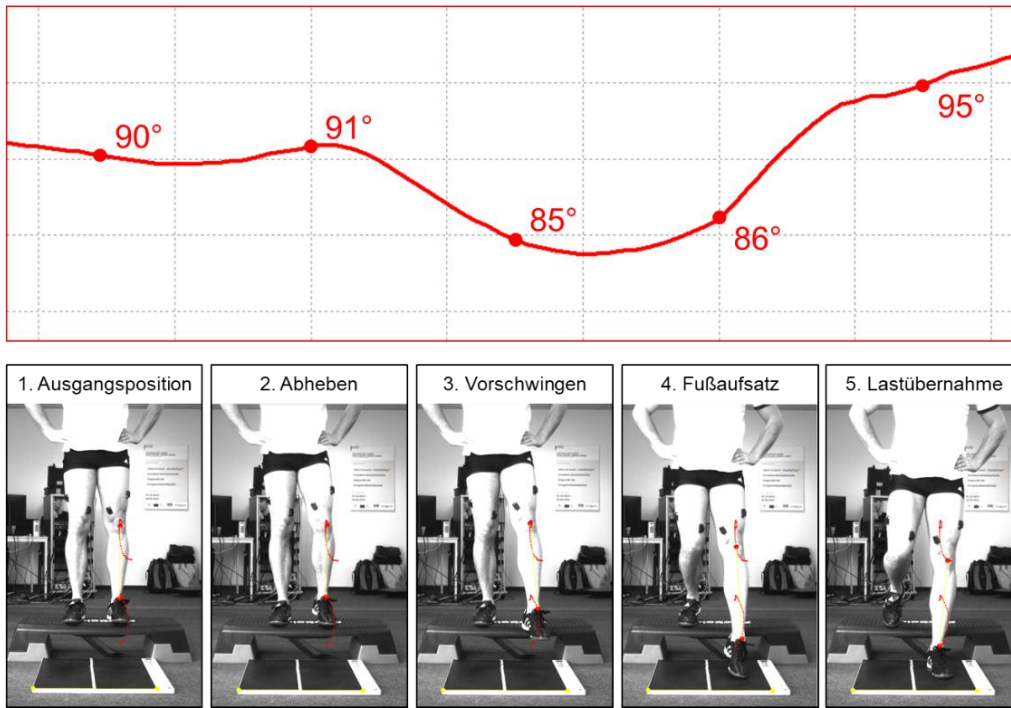


Abb. 32: Verlauf Unterschenkel-Boden-Winkels (oben) und Verlauf der Markerspuren in der Frontalebene (unten) während des Trepp-Absteigens auf das linke Bein.

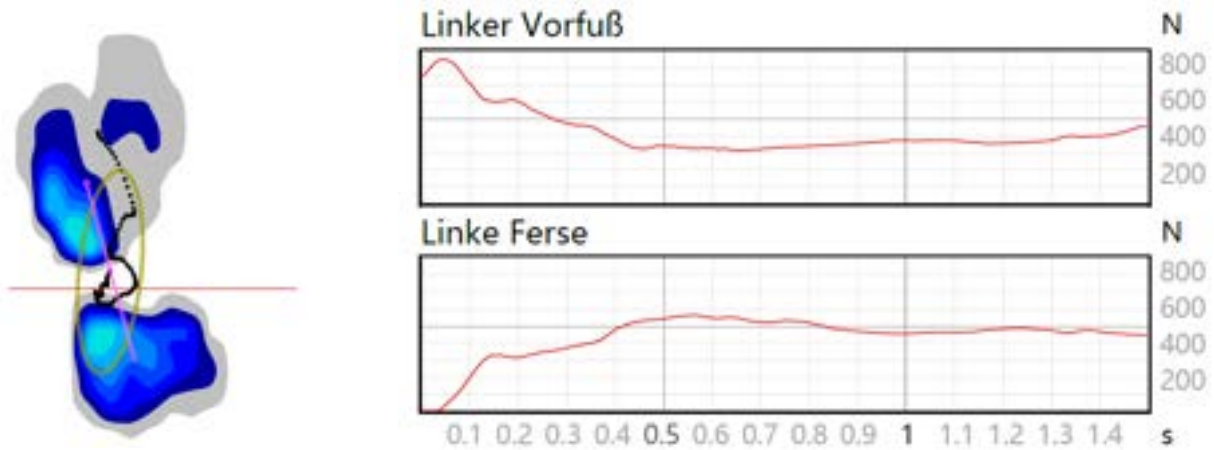


Abb. 33: Druckverteilung mit COP-Spur und 95% Vertrauensellipse des COP sowie die zugehörige Kraft-Zeit-Kurve für das Absteigen mit dem linken Bein.

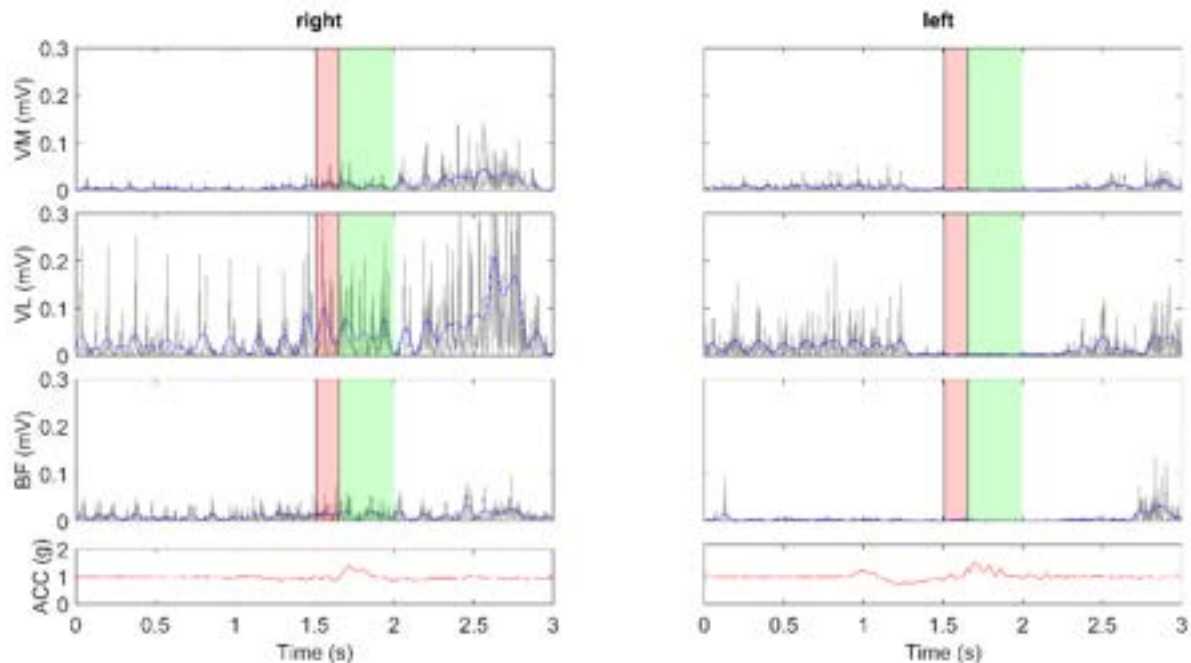


Abb. 34: Zusammengefasste Analyseschritte der elektromyographischen Signale und der in den Sensoren integrierten Beschleunigungssignale. Die Bereiche der Voraktivierung (rot) und Aktivierung (grün) verbindet der Zeitpunkt des initialen Bodenkontaktes. Dargestellt ist das Absteigen mit dem linken Bein.

Das Verständnis der potenziellen Ursachen von Muskel-Skelett-Verletzungen, deren Vermeidung oder Rehabilitation, insbesondere beim Leistungssportler, muss ihre multifaktorielle Natur berücksichtigen. Diese ergibt sich aus komplexen Zusammenhängen zwischen verschiedenen äußeren Bedingungen und modifizierbaren und nicht modifizierbaren intrinsischen Risikofaktoren ergibt (Kalkhoven et al. 2020). Somit sollten Messplätze multi-funktionale, multi-modale und multi-instrumentale Ansätze zusammenführen, um ein besseres Verständnis der Komplexität und Individualität relevanter Faktoren zu erlangen.

Die Ergebnisse einer systematischen Überprüfung von Cronström et al. (2021) mit einer Metaanalyse von 59.000 Personen zeigen, dass die Rückkehr zu einem hohen Aktivitätsniveau der wichtigste Risikofaktor für das Erleiden einer kontralateralen sekundären VKB-Verletzung war. Die Dynamik des Unfallmechanismus ist dabei wegweisend. Hiermit wird die Notwendigkeit der Analytik der schnellen Muskelfasern untermauert. Die Muskelfasertypologie beeinflusst die Zeit bis zur Erholung von hochintensiven Übungen erheblich (Lievens et al. 2020). Die Skelettmuskelermüdung wird unter anderen auch durch die Rate der Kraftentwicklung und Relaxation sowie durch die Aktionspotentialausbreitung beeinträchtigt (Allen et al. 2008). Die Intratwitch-Indizes der kontraktiven Eigenschaften sind nützlich, um intrazelluläre Ereignisse zu überwachen, die während dynamischer Übungen im Skelettmuskel auftreten. Die Muskelkontraktionseigenschaften werden in einer intensitätsabhängigen Weise während eines erschöpfenden dynamischen Trainings beim Menschen beeinträchtigt (Rannou et al. 2021). Der wichtigste Riskofaktor für eine kontralaterale sekundäre VKB Ruptur ist die Rückkehr zu einem hohen Aktivitätslevel mit besonderer Beanspruchung der schnell ermüdenden Fast twitch Fasern. Es bedarf einer besonderen Analyse des dynamischen Trainings dieser Strukturen damit man der ständig wachsenden Dynamik im Fußball auch präventiv gerecht werden kann.



Literatur

- Allen D.G., Lamb G.D., Westerblad H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol. Rev.*, 88, 287–332.
- Andrade R., Wik E.H., Rebelo-Marques A., et al. (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.
- Bache-Mathiesen L.K., Andersen T.E., Dalen-Lorentsen T., et al. (2021). Not straightforward: modelling non-linearity in training load and injury research. *BMJ Open Sport Exerc. Med.*, 7, e001119.
- Bittencourt N.F.N., Meeuwisse W.H., Mendonca L.D., et al. (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.
- Bowen L., Gross A.S., Gimpel M., et al. (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.
- Cronström A., Tengman E., Häger C.K. (2021). Risk factors for contra-lateral secondary anterior cruciate ligament injury: a systematic review with meta-analysis. *Sports Med.*, 51, 1419–1438.
- Dodson C.C., Secrist E.S., Bhat S. et al. (2016). Anterior cruciate ligament injuries in national football league athletes from 2010 to 2013. *Orthop. J. Sports Med.*, 4, 2325967116631949.
- Griffin A., Kenny I.C., Comyns T.M., et al. (2020). The association between the acute:chronic workload ratio and injury and its application in team sports: a systematic review. *Sport. Med.*, 50, 561–580.
- Kalkhoven J.T., Watsford M.L., Impellizzeri F.M. (2020). A conceptual model and detailed framework for stress-related, strain-related, and overuse athletic injury. *J. Sci. Med. Sport.*, 23, 726–734.
- Lievens E., Klass M., Bex T., et al. (2020). Muscle fiber typology substantially influences time to recover from high-intensity exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985), 128, 648–659.
- Losciale J.M., Zdeb R M., Ledbetter L., et al. (2018). The association between passing return-to-sport criteria and second anterior cruciate ligament injury risk: a systematic review with meta-analysis. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 49, 43–54.
- Platt B.N., Uhl T.L., Sciascia A.D., et al. (2021). Injury rates in major league baseball during the 2020 COVID-19 season. *Orthop. J. Sports Med.*, 9, 2325967121999646.
- Rannou F., Nybo L., Andersen J.E., et al. (2021). Muscle contractile characteristics during exhaustive dynamic exercise and recovery. *Front. Physiol.*, 12, 660099.
- Seshadri D.R., Thom M.L., Harlow E.R., et al. (2021). Wearable technology and analytics as a complementary toolkit to optimize workload and to reduce injury burden. *Front. Sports Act. Living*, 2, 630576.
- Whiteley R., Massey A., Gabbett T., et al. (2020). Match high-speed running distances are often suppressed following return from hamstring strain injury in professional footballers. *Sports Health*, 12, 1941738120964456.
- Zaffagnini S., Grassi A., Serra M., et al. (2015). Return to sport after ACL reconstruction: how, when and why? A narrative review of current evidence. *Joints*, 3, 25–30.



9 Verletzungsgeschehen HFC – Vorstellung primär- & sekundärpräventiver Maßnahmen

Hintergrund

In unserer letzten Bewerbung berichteten wir bereits über den Einsatz der Stochastischen Resonanztherapie und der Blood Flow Restriction (BFR) im Rahmen der Frührehabilitation und über Training mit nicht vorhersehbaren Störgrößen auf dem SpeedCourt in der spätrehabilitativen Phase nach VKB-Ruptur (Bartels et al. 2016a; Bartels et al. 2016b).

Seither setzen wir BFR im Trainingsbetrieb des HFC bei sich anbahnenden Überlastungsreaktionen der Achillessehne, der Patellasehne und nach partiellen Bandverletzungen des Sprunggelenkes ein. Dabei werden mehrmals täglich dynamisch konzentrisch-exzentrische Muskelaktionen in der geschlossenen Kette unter Anlegen einer Oberschenkel Blutsperremanschette mit Druck zwischen 130 und 160 mmHg durchgeführt. Die Blutdruckmanschette muss alle 5 Minuten geöffnet werden und nach Erholung kann der Vorgang wiederholt werden. Eine Serie umfasst 3-4 Wiederholungen (Pröger et al. 2018).

Nach Operationen (laterale Bandverletzungen und VKB Rupturen) kann diese Behandlung auch unmittelbar ab der 2. postoperativen Woche beginnen, dann jedoch zunächst mit rein isometrischem Training in Streckstellung. Wie im Fallbeispiel von Jannes Vollert (HFC Innenverteidiger) ersichtlich (Abb. 35a-e), zeigte sich 3 Monate nach Operation des Außenbandkomplexes bereits eine größere Muskelkraft im operierten rechten Bein im Vergleich zum nicht operierten Bein. Es hat sich gezeigt, dass BFR eine effektive Methode zur Verbesserung der neuromuskulären Adaptation ist (Pröger et al. 2018). Der Umstand, dass lediglich die Extremitäten trainiert werden können, nicht aber der Rumpf, ist sicherlich ein Nachteil der Methode. Dennoch ist die Effektivität nachgewiesen (Jessee et al. 2018; Lorenz et al. 2021a; Lorenz 2021b). Obwohl BFR eine sehr vielversprechende und wirksame Innovation in unserem Bereich zu sein scheint, ist es wichtig zu bedenken, dass akzeptierte, bewährte Trainingspraktiken und -prinzipien nicht aufgegeben werden.

Wie bereits in Kapitel 7 beschrieben, sind verletzungsbedingte Funktionsdefizite die absolute Domäne des sensomotorischen Lern- und weniger des Krafttrainings, weil die neurophysiologischen Funktionsstörungen im Vordergrund stehen. Die sehr komplexen neuromuskulären Prozesse benötigen eine ausgewogene und wissenschaftlich überwachte Steuerung.

Folgende BFR Übungen werden bei uns 3 x wöchentlich bei Patienten nach vorderer Kreuzbandplastik und anderen Knieoperationen angewendet:

- Postoperative Anbahnung und Aktivierung,
- Knieextension ohne bzw. mit einer distal angebrachten Gewichtsmanschette,
- Beinpresse,
- Squats/Lunges,
- Fahrradergometer,
- Leg Extension (Beinstrecker),
- Prone LegCurl (Beinbeuger),
- Tappings.

Im Einzelfall können einzelne Übungen infolge individueller Voraussetzungen oder Kontraindikationen entfallen oder erst zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb der Rehabilitation durchgeführt werden. Loenneke et al. (2011, 2013) schlussfolgerten,



dass zwei bis drei Trainingseinheiten pro Woche größere Leistungszuwächse provozieren, als vier bis fünf Übungstage.

BFR-Training, beispielhaft für die Rehabilitation nach VKB-Ruptur in Tabelle 11 beschrieben, eignet sich aufgrund der verminderten Lasten und der hohen Effizienz gut für das postoperative Training der Extremitäten. Wissenschaftlich konnte die Wirkung des BFR-Trainings weitgehend belegt werden, auch wenn (noch) nicht alle Mechanismen erklärt werden können.

Die systematische Hormonantwort, speziell der Wachstumshormone, ist bei einem Training mit BFR ähnlich der, als wenn mit hohen Gewichten ohne BFR trainiert werden würde (Loenneke et. al. 2012). Mit zunehmender Dauer der Okklusion geht die Muskulatur eine Sauerstoffschuld ein, was wiederum zu einer Anhäufung von metabolischen Nebenprodukten führt und eine Ermüdung der aktiven Fasern der Muskulatur zur Folge hat. Infolgedessen kommt es zur vermehrten Aktivierung noch nicht zugeschalteter motorischer Einheiten speziell der anaerob versorgten schnellen Muskelfasern (Jessee et al. 2018).

Tab. 11: Übersicht über die Vorgehensweise der vorgestellten Trainingsformen nach dem Nachbehandlungsschema der Sportklinik Halle – die beschriebenen Trainingsempfehlungen beziehen sich auf eine isolierte vordere Kreuzbandruptur nach Rekonstruktion.

Übung	Anlage	Druck [mmHg]	Belastung [min]	Pause [min]	Sätze	Empfehlung nach VKB-Plastik
Postoperative Anbahnung und Aktivierung	unilateral	130-150	5	3	3	sofort
Knieextension im Sitzen	unilateral	150	5	3	3-5	sofort, ohne Gewicht/mit distal angelegtem Gewicht, 6 Monate
Beinpresse im Liegen	unilateral	150	5	3	3-5	6 Wochen
Squat/Split-Squat/Lunge	bilateral	150	5	3	3-5	6 Wochen
Fahrradergometer	bilateral	150	5	3	3-5	6 Wochen
Leg Extension/ Prone Leg Curl	unilateral	150	5	3	3-5	6 Monate/ 6 Wochen
Tappings	bilateral	150	5	3	3-4	2 Monate

a)



b)



c)



d)



e)

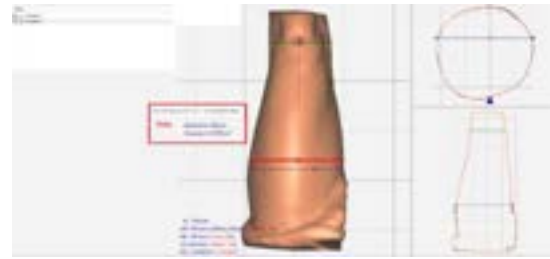


Abb. 35a-e: Jannes Vollert, HFC 3 Monate nach Rekonstruktion der lateralen Bandstrukturen rechtes Kniegelenk. a) Rehabilitation mit BFR Therapie an der Beinpresse, b) Rehabilitation isometrisch mit BFR Therapie, c) reine Muskelkraft des operierten Beines größer als des nicht operierten Beines, d) Volumenmessung mittels Infrarotanalyse operiertes Bein e) Volumenmessung des nicht operierten Beines.

Unabhängig von der Dauer des sensorischen Funktionsverlustes nach VKB-Ruptur kann davon ausgegangen werden, dass Veränderungen in der zentralen Informationsverarbeitung entstehen. Die Reaktivierung der Propriozeption wird somit als ein zentrales Ziel in der Rehabilitation von Kniegelenksverletzungen propagiert (Georgoulis et al. 2001).

Der Einsatz der stochastischen Resonanz ist hierbei ein erfolgversprechender Ansatzpunkt, um eine verbesserte spinale Antwort zu generieren.

Eine Studie von Haas (2002) lässt die Interpretation zu, dass mechanische Schwingungsreize mit der aufgezeigten Charakteristik propriozeptive und daraus resultierende neuromuskuläre Steuerungsvorgänge signifikant optimieren. Auf der Basis der spektralanalytischen Daten, aus denen eine Erhöhung der primär dominanten Frequenz hervorgeht, lässt sich schlussfolgern, dass es zu einem früheren neuromuskulären Ansprechen kommt, mit der Folge, dass Störeinflüssen früher entgegengewirkt werden kann. Da der Umfang der Störung dabei geringer ist, bedarf es zur Haltungskontrolle dementsprechend auch einer geringeren muskulären Aktivierung. Neben der therapeutischen Behandlung nach VKB Rekonstruktion und im Anschluß an Bandrupturen der unteren Extremität wird die stochastische Resonanz mittels Zeptor insbesondere zur Prävention von funktionellen Defiziten nach Sprunggelenksbandverletzungen eingesetzt.



Dabei werden an 10 aufeinander folgenden Tagen je 10 Behandlungen à 30-60 s Therapie und 30 s Erholung in Kniebeugung und Einbeinstand realisiert. Nach einem Monat wird diese Serie wiederholt. Ziel ist es, besonders anfällige Spieler, die trotz mechanischer Stabilität des oberen Sprunggelenkes (OSG) über eine funktionelle Instabilität verfügen, im Bereich des OSG zu stabilisieren.

Die anhaltenden neuromuskulären Defizite nach VKB-Ruptur sollten in der postoperativen Rehabilitation mehr Aufmerksamkeit finden (Rissberg et al. 2007; Hewett et al. 2013). Neben den Unterschieden in der Maximalkraft bestehen Defizite im Schnell- und Reaktivkraftverhalten (schneller Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus) häufig auch nach der Therapie fort. Das Bewusstsein, dass es sich bei diesen beiden Erscheinungsformen des Kraftverhaltens um notwendige und wichtige Komponenten der Alltagsmotorik handelt, hat sich noch nicht durchgesetzt. Folglich wird der Patient aus dem Rehabilitationstraining entlassen, wenn die Maximalkraftwerte normal erscheinen (siehe Kapitel 7). Ein Training der Schnellkraftfähigkeiten und der reaktiven Kraftfähigkeiten wird oft vernachlässigt oder ist im engen zeitlichen Rahmen der Rehabilitation nicht möglich. Neuronale und tendomuskuläre Einflussgrößen für das Kraftverhalten des Muskels werden damit in der Rehabilitation oft nicht berücksichtigt. Bestehen die genannten Defizite weiter, können neue Verletzungen durch Schonhaltungen der verletzten Seite mit resultierender Überbeanspruchung der gesunden Extremität erwartet werden.

Die Studienergebnisse zeigen, dass ein hochreaktives Training auf dem SpeedCourt die Schnellkeits- und Schnellkraftleistungen von Fußballspielern deutlich verbessert (Bartels et al. 2016a,b). Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der sehr geringen Reizdichte (1 TE/Woche) bemerkenswert. Die beobachtete Leistungssteigerung korrespondierte überdies mit einem deutlichen Rückgang der Verletzungsrate.

Das Training mit nicht vorhersehbaren Störgrößen auf dem SpeedCourt setzen wir beim HFC insbesondere in der Rehabilitation von Bandverletzungen jedlicher Art in der spätrehabilitativen Phase ein. Es wird im unermüdeten Zustand nach 15 min Erwärmung durchgeführt und auf maximal 30 Minuten beschränkt (Cool down: 15 min). Das motorische Lernen unterstützt die Neuroplastizität nach einer VKB Rekonstruktion (Gokeler et al. 2019). Für die optimale Lösung sind möglicherweise motorische Lernprinzipien erforderlich, die individuell auf die verletzten Athleten zugeschnitten sind.

Durch die Einbeziehung eines externen Aufmerksamkeitsschwerpunkts wird die intrakortikale Hemmung im primären motorischen Kortex (M1) verändert (Kuhn et al. 2017). Zusätzlich zu früheren Forschungen, die die Aufmerksamkeitsaktivität innerhalb von M1 adressierten, schlußfolgerten Kuhn et al. (2017), dass die Modulation von intrakortikalen Hemmkreisläufen wahrscheinlich zu einer verbesserten motorischen Effizienz bei der Hinzuführung eines externen Aufmerksamkeitsschwerpunktes beiträgt. Auch die Ergebnisse von Pincheira et al. (2018) bestätigen die Effektivität des Trainings mit nicht vorhersehbaren Störungen. Es resultiert daraus eine Veränderung in der zentralen Verarbeitung der propriozeptiven Information und / oder der Reorganisation des zentralen Nervensystems, die die neuromuskuläre Kontrolle der Kniemuskeln in den beteiligten und nicht betroffenen unteren Gliedmaßen beeinflussen kann.



Literatur

- Bartels T., Proeger S., Brehme K., et al. (2016a). The SpeedCourt system in rehabilitation after reconstruction surgery of the anterior cruciate ligament (ACL). *Arch Orthop Trauma Surg*, 136, 957–966.
- Bartels T., Proeger S., Brehme K., et al. (2016b). Fast response training in youth soccer players. *Sportverl. Sportschad.*, 30, 143–148.
- Georgoulis A.D., Pappa L., Moebius U., et al. (2001). The presence of proprioceptive mechanoreceptors in the remnants of the ruptured ACL as a possible source of re-innervation of the ACL autograft. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 9, 364–368.
- Gokeler A., Neuhaus D., Benjaminse A., et al. (2019). Principles of Motor Learning to Support Neuroplasticity After ACL Injury: Implications for Optimizing Performance and Reducing Risk of Second ACL Injury. *Sports Med.*, 49, 853–865.
- Haas C (2002). *Simulation und Regulation mechanischer Schwingungen im alpinen Skirennlauf*. Dissertation, Köln: Sport und Buch Strauss.
- Jessee M.B., Mattocks K.T., Buckner S.L., et al. (2018). Mechanisms of blood flow restriction: The new testament. *Tech. Orthop.*, 33, 72–79.
- Kuhn Y.A., Keller M., Ruffieux J., et al. (2017). Adopting an external focus of attention alters intracortical inhibition within the primary motor cortex. *Acta Physiol (Oxf)*, 220, 289–299.
- Loenneke J.P., Fahs C., Rossow L., et al. (2012). Effects of cuff width on arterial occlusion: Implications for blood flow restricted exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112, 2903–2912.
- Loenneke J.P., Thiebaud R.S., Fahs C.A., et al. (2013). Blood flow restriction does not result in prolonged decrements in torque. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 113, 923–931.
- Lorenz D.S., Bailey L., Wilk K.E., et al. (2021). Blood Flow Restriction Training. *J. Athl. Train.*, 56, 937–944.
- Lorenz D. (2021). Blood Flow Restriction: Cause for Optimism, But Let's Not Abandon The Fundamentals. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 16, 962–967.
- Pincheira P.A., Silvestre R., Armijo-Olivo S., et al. (2018). Ankle perturbation generates bilateral alteration of knee muscle onset times after unilateral anterior cruciate ligament reconstruction. *Peer J.* 6, e5310.
- Pröger S., Kurz E., Brehme K., et al. (2018). Blood Flow Restriction Training nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes. *Sportphysio*, 6, 227–234.



10 Hüftabduktionskraft – potentieller Indikator für das Verletzungsrisiko der unteren Extremität

Hintergrund

Die Vorhersage von Verletzungen ist eines der herausforderndsten Themen im Sport und eine Schlüsselkomponente für die Prävention von Verletzungen, da die erfolgreiche Identifizierung von Verletzungsvorhersagern die Grundlage für wirksame Präventionsmaßnahmen bildet.

Mittels Kombination von neuromuskulären und biomechanischen Faktoren, einschließlich Hüftabduktionskraft, Knieneigungswinkel in der Frontal- und Sagittalebene, und unter Berücksichtigung von Defiziten in der posturalen Stabilität kann man eine zweite Verletzung nach VKB Rekonstruktion mit 92% Sensitivität und 88% Spezifität prognostizieren (Paterno et al. 2010). Diese Befunde sind wichtig, da sie zeigen, dass Restdefizite in der neuromuskulären Kontrolle auf eine zweite VKB-Ruptur hindeuten, nachdem Sportler ihre sportliche Betätigung wieder aufgenommen haben.

Wie bereits im Kapitel 7 erwähnt, konnten alle Fortschritte in der postoperativen Rehabilitation und der Identifizierung von Risikofaktoren für eine zweite Verletzung bisher nicht zu einer Verringerung des sekundären VKB-Verletzungsrisikos beitragen (Nagelli und Hewett 2017). Die Wiederherstellung der Kniegesundheit und -funktion sollte deshalb eine grundlegende Voraussetzung für die Rückkehr zum Sport nach VKB Rekonstruktion sein.

Die menschliche Bewegung ist ein komplexes und dynamisches System, und die Variabilität der Bewegung bietet einem Individuum redundante Strategien, um gewünschte Aufgaben auszuführen. Kraft ist zwar wichtig, aber isolierte Kräftigung berücksichtigt nicht das motorische Lernen (Ansteuerungsaspekt), das nach einer neurophysiologischen Verletzung stattfinden muss (Machan et al. 2021).

Messungen der isometrischen Hüftabduktion vor der Saison und der externen Rotationsstärke sagen unabhängig voneinander den zukünftigen Status einer berührungslosen ACL-Verletzung bei Leistungssportlern voraus (Khayambashi et al. 2016). Sie zeigen, dass die Ausgangswerte der Kraftmessung der Hüftabduktoren bei Sportlern mit VKB-Verletzung ohne Kontakt signifikant niedriger waren als bei nicht verletzten Sportlern. Basierend auf biomechanischen Prinzipien und aktuellen Studien wird eine Schwäche der Hüftabduktorenkraft als prädisponierender Risikofaktor für eine berührungslose VKB-Verletzung vorgeschlagen (Khayambashi et al. 2016).

Die Studiendaten deuten darauf hin, dass Screening-Verfahren zur Beurteilung des VKB-Verletzungsrisikos eine Bewertung der isometrischen Hüftabduktion umfassen sollten (Khayambashi et al. 2016). Variationen der Hüftabduktionskraft werden auch mit einer Reihe weiterer Erkrankungen des Muskel- Skelettsystems der unteren Extremität in Zusammenhang gebracht (Fredericson et al. 2000; Nadler et al. 2000; Tyler et al. 2001; Nadler et al. 2002; Souza und Powers 2009; Powers et al. 2017; Mosler et al. 2020)

Das von uns verwendete microFET2 (MicroFET2/ Wireless Digital Dynamometer der Firma Hoggan Scientific 3653 W 1987 S Salt lake City, UT 84104) ist ein präzises, tragbares (FET- Force-Evaluation-Testing) Kraftmessgerät (Abb. 36a), das speziell dafür entwickelt wurde, objektive, zuverlässige und quantifizierbare Muskelkraftmessungen (Abb. 36b) durchzuführen (Aramaki et al. 2016; Martins et al. 2017; Byrne et al. 2020).

Eine Referenzdatenbank für Hüftabduktionskraftmessungen in der Lebensspanne (n=100-217 pro Dekade; Altersrange: 20-79 Jahre) wurde von Bohannon (1997) erstellt und publiziert.

a)

b)



Abb. 36a-b: a) Diagnostik der Hüftabduktionskraft mittels microFET2 (MicroFET2/ Wireless Digital Dynamometer der Firma Hoggan Scientific 3653 W 1987 S Salt lake City, UT 84104) sowie b) Testdurchführung beim HFC.

Es hilft bei der Diagnose, Prognose und Behandlung von neuromuskulären und muskuloskelettalen Störungen. Die Hauptvorteile von Muskeltests mit Handheld-Dynamometern im Vergleich zur herkömmlichen Methode sind die Objektivität der Messungen und die hohe Interraterreliabilität (Byrne et al. 2020).

In der Saisonvorbereitung wurde beim HFC ein Training der Hüftabduktionskraft regelmäßig in den Trainingsplan mittels Therabändern integriert (Abb. 37). Während der Saison wird bisher das Hüftabduktionstraining auf die Rehabilitation von Verletzungen und auf Spieler mit Defiziten in der Funktion beschränkt.



Abb. 37: Training der Hüftabduktionskraft beim HFC mittels Therabändern.

Zur Objektivierung der individuellen Messdaten wird aktuell eine Datenbank aufgebaut, in der die Ausgangswerte jedes Spielers im gesunden Zustand dokumentiert werden. Durch die externe Stabilisierung eines Prüfstands wird, wie oben bereits bemerkt, eine hohe Interraterreliabilität der Hüftabduktionsmessungen garantiert (Byrne et al. 2020). Die Messungen dauern etwa 8 Minuten, einschließlich Markierung, Positionierung und 4 Wiederholungen jeder spezifischen Bewegung mit mindestens 30 Sekunden Ruhezeit zwischen den Wiederholungen. Das Assessment ist somit zeiteffizient und



praktikabel im Trainingsalltag einsetzbar und überdies ideal für klinische Untersuchungen. Mit der Hand gemessene Muskelkräfte ohne externe Stabilisierung sollten aufgrund vieler Einschränkungen nicht in wissenschaftliche Studien einfließen (Nakase et al. 2020).

Die aktuelle Literatur ist hinsichtlich biomechanischer Risikofaktoren für VKB-Verletzungen inkonsistent. Es haben sich jedoch einige Trends heraus kristallisiert. Larwa et al. (2021) konnten zeigen, dass starre Landungen, geringe Rumpfstabilität, schwache Hüftabduktionskraft, erhöhtes Knievalgus, und eine Landung in einer Fersenaufschlagposition das Risiko einer VKB-Verletzung erhöhen. Hochrisiko-Landeereignisse enthalten das biomechanische Potenzial für eine berührungslose Kniebandverletzung und führen häufig zu einem Knieabduktionskollaps während der Landung (Clark 2021). Sicherlich bedarf es mehr Komplexität in der Prävention von Verletzungen. Es bleibt auch die Frage zu klären, wie komplex kann man bei den heutigen Spielzeitplänen überhaupt noch trainieren und wie werden neue Methoden unter standardisierten Bedingungen in die Rehabilitationsprogramme integriert? Eine Kombination aus neuromuskulären Umschulungsprogrammen, Verbesserung von Muskelkraftwerten (Hüftabduktion) und das Training von nicht vorhersehbaren Störgrößen sollten zentrale Bestandteile verletzungspräventiver Programme sein (Barber-Westin et al. 2009; Nagelli et al. 2020; Nagelli et al. 2021; Bulow et al 2021). Fehlerhafte neuromuskuläre und biomechanische Defizite des Knies sind bei Sportlern nach der Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes (ACLR) nahezu allgegenwärtig. Dennoch bleibt viel Forschungsbedarf insbesondere auf molekularer und elektrophysiologischer Ebene auch im Hinblick der Bedeutung der Ermüdung. Die Ergebnisse einer systematischen metanalytischen Überprüfung (n=59.000) zeigten, dass die Rückkehr zu einem hohen Aktivitätsniveau der wichtigste Risikofaktor für das Erleiden einer kontralateralen sekundären VKB-Verletzung war (Cronström et al. 2021).

Literatur

Aramaki H., Katoh M., Hiiragi Y., et al. (2016). Validity and reliability of isometric muscle strength measurements of hip abduction and abduction with external hip rotation in a bent-hip position using a handheld dynamometer with a belt. *J. Phys. Ther. Sci.*, 28, 2123–2127.

Barber-Westin S.D., Noyes F.R., Smith S.T., et al. (2009). Reducing the risk of noncontact anterior cruciate ligament injuries in the female athlete. *Phys. Sportsmed.*, 37, 49–61.

Bohannon R.W. (1997). Reference values for extremity muscle strength obtained by hand-held dynamometry from adults aged 20 to 79 years. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 78, 26–32.

Bulow A., Anderson J.E., Leiter J.R.S., et al. (2021). Sicherheit und Wirksamkeit eines störungsbasierten neuromuskulären Trainingsprogramms zum dynamischen Gleichgewicht bei jugendlichen Frauen: Eine randomisierte kontrollierte Studie. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 16, 1001–1015.

Byrne A., Lodge C., Wallace J. (2020). Intrarater Test-Retest Reliability of Hip Abduction, Internal Rotation, and External Rotation Strength Measurements in a Healthy Cohort Using a Handheld Dynamometer and a Portable Stabilization Device: A Pilot Study. *Arch. Rehabil. Res. Clin. Transl.*, 2, 100050.

Clark N.C. (2021). Noncontact Knee Ligament Injury Prevention Screening in Netball: A Clinical Commentary with Clinical Practice Suggestions for Community-Level Players. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 16, 911–929.

Cronström A., Tengman E., Häger C.K. (2021). Risk Factors for Contra-Lateral Secondary Anterior Cruciate Ligament Injury: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Med.*, 51, 1419–1438.

Fredericson M., Cookingham C.L., Chaudhari A.M., et al. (2000). Hip abductor weakness in distance runners with iliotibial band syndrome. *Clin. J. Sport Med.*, 10, 169–75.



- Khayambashi K., Ghoddosi N., Straub R.K., et al. (2016). Hip Muscle Strength Predicts Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury in Male and Female Athletes: A Prospective Study. *Am. J. Sports Med.*, 44, 355–361.
- Larwa J., Stoy C., Chafetz R.S., et al. (2021). Stiff Landings, Core Stability, and Dynamic Knee Valgus: A Systematic Review on Documented Anterior Cruciate Ligament Ruptures in Male and Female Athletes. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 18, 3826.
- Machan T., Krupps K. (2021). The Neuroplastic Adaptation Trident Model: A Suggested Novel Framework for ACL Rehabilitation. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 16, 896–910.
- Martins J., da Silva J.R., da Silva M.R.B., Bevilaqua-Grossi D. (2017). Reliability and Validity of the Belt-Stabilized Handheld Dynamometer in Hip- and Knee-Strength Tests. *J. Athl. Train.*, 52, 809–819.
- Mosler A.B., Kemp J., King M., et al. (2020). Standardised measurement of physical capacity in young and middle-aged active adults with hip-related pain: recommendations from the first International Hip-related Pain Research Network (IHiPRN) meeting, Zurich, 2018. *Br. J. Sports Med.*, 54, 702–710.
- Nadler S.F., Malanga G.A., DePrince M., et al. (2000). The relationship between lower extremity injury, low back pain, and hip muscle strength in male and female collegiate athletes. *Clin. J. Sport Med.*, 10, 89–97.
- Nadler S.F., Malanga G.A., Solomon J.L., et al. (2002). The relationship between lower extremity injury and the hip abductor to extensor strength ratio in collegiate athletes. *J. Back Musculoskelet. Rehabil.*, 16, 153–158.
- Nagelli C.V., Hewett T.E. (2017). Should Return to Sport be Delayed Until 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction? Biological and Functional Considerations. *Sports Med.*, 47, 221–232.
- Nagelli C.V., Di Stasi S., Wordeman S.C., et al. (2021). Knee Biomechanical Deficits During a Single-Leg Landing Task Are Addressed With Neuromuscular Training in Anterior Cruciate Ligament-Reconstructed Athletes. *Clin. J. Sport Med.*, 31, 113–119.
- Nagelli C., Di Stasi S., Tatarski R., et al. (2020). Neuromuscular Training Improves Self-Reported Function and Single-Leg Landing Hip Biomechanics in Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthop J. Sports Med.*, 8, 2325967120959347.
- Nakase J., Kitaoka K., Shima Y., et al. (2020). Risk factors for noncontact anterior cruciate ligament injury in female high school basketball and handball players: A prospective 3-year cohort study. *Asia Pac. J. Sports Med. Arthrosc. Rehabil. Technol.*, 22, 34–38.
- Paterno M.V., Schmitt L.C., Ford K.R., et al. (2010). Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am. J. Sports Med.*, 38, 1968–1978.
- Powers C.M., Ghoddosi N., Straub R.K., et al. (2017). Hip Strength as a Predictor of Ankle Sprains in Male Soccer Players: A Prospective Study. *J. Athl. Train.*, 52, 1048-1055.
- Souza R.B., Powers C.M. (2009). Differences in hip kinematics, muscle strength, and muscle activation between subjects with and without patellofemoral pain. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 39, 12–19.
- Tyler T.F., Nicholas S.J., Campbell R.J., et al. (2001). The association of hip strength and flexibility with the incidence of adductor muscle strains in professional ice hockey players. *Am. J. Sports Med.*, 29, 124–128.



Schlussbemerkung

Wie bereits in der Schlussbemerkung zur letzten Preiseinreichung bemerkt, nimmt die Diagnostik von Ermüdung und Erholtheit im Sport im Allgemeinen und im Fußball im Speziellen einen sehr hohen Stellenwert ein. Diesbezüglich sollte nach validen und praktikablen Lösungen gesucht werden. Hierzu liefert diese Arbeit vielversprechende Ergebnisse und Ansätze. Die individuellen Referenzdaten für CK und Laufbandleistungsdiagnostik, in Kombination mit dem verbesserten Spielmonitoring, versetzen uns nunmehr in die Lage, das Training kurz- und mittelfristig exakter steuern zu können. Mit dem „3 gegen 3“ steht überdies eine praktikable Trainings- und Spielform zur Verfügung, die eine fußballspezifische Beurteilung der kardialen Erholungsfähigkeit erlaubt. Die sehr hohe Korrelation zur v4 ($r=0,91$) verleiht der etablierten Laktatleistungsdiagnostik eine deutlich größere Fußballspezifik als man dies bislang annehmen konnte.

Mit dem neuen dEMG-Analyseportal im Rahmen der VKB-RTC-Testung (Ampelprinzip) steht ein neues, innovatives Assessment bereit, welches offensichtlich deutlich sensitiver ist als vergleichbare Tests. Mittels dieser elektromyographisch-dynamometrisch akzentuierten Testbatterie gelang es, die Rerupturrate der in der Sportklinik am vorderen Kreuzband operierten Patienten auf Null zu senken! Der wichtigste Risikofaktor für eine kontralaterale sekundäre VKB Ruptur ist die Rückkehr zu einem hohen Aktivitätslevel mit besonderer Beanspruchung der schnell ermüdenden Fast twitch Fasern. Es bedarf daher einer besonderen Analyse des dynamischen Trainings dieser Strukturen, um der ständig wachsenden Dynamik im Fußball auch präventiv gerecht werden zu können. Unser, gemeinsam mit der Firma Dögel GmbH, entwickeltes innovatives Analysetool, welches im Kapitel 7 vorgestellt wurde, stellt diesbezüglich einen vielversprechenden Lösungsansatz dar. Dessen Ausdifferenzierung wird Gegenstand eines zukünftigen Forschungsprojektes in gleicher Konstellation sein.

Die einfach mittels Dynamometrie zu messende Hüftabduktion scheint ein überaus valider Parameter für eine erhöhte Verletzungsanfälligkeit seitens des Sprunggelenks und des vorderen Kreuzbandes zu sein.

Durch die Intensivierung der Kooperation zwischen der Sportklinik Halle mit dem Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie der MLU Halle-Wittenberg konnte die wissenschaftliche Analyse aller Maßnahmen beim Halleschen FC weiter qualifiziert und verstetigt werden. Beispielhaft seien hier die Auswertereports für die Spielanalyse mittels Polar Team Pro System und die damit verbundenen wissenschaftlichen Publikationen genannt (Kapitel 2 und 5). Insofern konnten die vor nunmehr 4 Jahren im Ausblick der Preiseinreichung formulierten Ziele erreicht und teilweise noch übertroffen werden.

Abschließend sei darauf verweisen, dass der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn auch zu positiven infrastrukturellen Veränderungen beim HFC geführt hat. So wurde 2020 die Stelle des Athletiktrainers (Ken Kaiser) im Trainerteam des Drittligateams neu geschaffen. Darüber hinaus wurde zur Saison 2021/2022 durch den neuen Sportdirektor (Ralf Minge) auch die Stelle des Video- und Datenanalysten (Max Bergmann) ins Leben gerufen und ein deutlich leistungsfähigeres Umfeld strukturiert. Dies sowie die Einbeziehung der A- und B-Jugend in die leistungsdiagnostischen Maßnahmen für das Drittligateam dokumentieren ein verändertes diesbezügliches Bewusstsein sowie die kontinuierliche Verbesserung und Professionalisierung des (Funktions)Teams hinter dem Team.



Perspektivisch streben wir die Erstellung einer Datenbank an, die „innerbetrieblich“ alle vorgestellten Daten und Maßnahmen bündelt, um sie inhaltlich multivariat miteinander vernetzen und die Effektivität des (iterativen) Gesamtprozesses (Datenerhebung, -analyse, Trainings- und Therapiempfehlungen etc.) deutlich verbessern zu können. Dadurch soll es u.a. gelingen, Verletzungsursachen und –mechanismen besser zu verstehen, indem diese exakt dokumentiert, kategorisiert (z. B. Kontakt-, vs. Nichtkontaktverletzungen, biomechanischer Verletzungsmechanismus, Randbedingungen) und mit den Anamnese- und Testdaten (z. B. Verletzungshistorie, anatomische Abnormitäten, auffällige Spiel- und/ oder Testdaten) abgeglichen werden. Die Entwicklung und Etablierung einer solchen Software respektive Datenbank würde, unserem ganzheitlichen Ansatz von Diagnostik und Therapie/ Training rechnungstragend, enormen Erkenntnisgewinn seitens der Verletzungsprävention und Leistungsentwicklung generieren und die Arbeit aller Akteure (Teamarzt, Physiotherapeuten, Trainer, Sportdirektor, Sportwissenschaftler) auf ein neues Niveau heben.