

Matthias W. Hoppe^{1,2,3}, Christian Baumgart^{2,3}, Mirko Slomka⁴, Casper Grim¹, Martin Engelhardt¹, Jürgen Freiwald^{2,3}

Konditionelle Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

*Physical performance assessment in elite soccer –
past, present and future*

Zusammenfassung: Zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball können gegenwärtig extern validere bzw. spezifischere Testverfahren herangezogen werden als in den 70er-Jahren. Ursächlich hierfür ist der messtechnologische Fortschritt. State of the Art zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball sind Ortungssysteme und innovative Algorithmen. Zukünftig werden diese auch Analysen von technisch-taktischen Fertigkeiten und Bewegungen erlauben. Weitere Entwicklungspotenziale bestehen im Bereich der Datenanalytik im Rahmen von integrativen Ansätzen und in der Anwendung zum Monitoring der Rehabilitation nach Verletzungen auf dem Fußballplatz. Hinsichtlich der Rehabilitation wird zukünftig eine noch engere Verzahnung der konditionellen Leistungsdiagnostik mit orthopädisch-funktionsdiagnostischen Aspekten notwendig sein.

Schlüsselwörter: Big Data; Energiestoffwechsel; Exzentrik; Global Positioning System (GPS); Spielaufleistung; vorderes Kreuzband (VKB)

Zitierweise

Hoppe MW, Baumgart C, Slomka M, Grim C, Engelhardt M, Freiwald J: Konditionelle Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. OUP 2018; 7: 536–544 DOI 10.3238/oup.2018.0536–0544

Summary: For physical performance assessment in elite soccer, there are presently more external valid and specific testing procedures than in the seventies. The reason for this is mainly due to the technological progress. State of the art for physical performance assessment in elite soccer are positioning systems and innovative algorithms. In the future, these technologies will also allow assessments of technical-tactical skills and movements. Further development potentials exist in the data processing using integrative approaches and application for monitoring the on-field rehabilitation after injuries. In terms of the rehabilitation, an even closer combination between physical performance and orthopedic-functional aspects will be necessary in the future.

Keywords: anterior cruciate ligament (ACL); big-data; energy metabolism; eccentric; football; Global Positioning System (GPS); match running performance

Citation

Hoppe MW, Baumgart C, Slomka M, Grim C, Engelhardt M, Freiwald J: Physical performance assessment in elite soccer – past, present and future. OUP 2018; 7: 536–544 DOI 10.3238/oup.2018.0536–0544

Einleitung

Aus einer trainingswissenschaftlichen Perspektive können leistungsdiagnostische Untersuchungen als standardisierte Testverfahren definiert werden, die der Beschreibung der aktuellen Leistungsfähigkeit eines Sportlers (d.h. dem Ist-Zustand) dienen. Durch den Ver-

gleich mit Normwerten (d.h. dem Soll-Zustand) können Trainingsempfehlungen abgeleitet und Talente identifiziert werden. Darüber hinaus können leistungsdiagnostische Untersuchungen im Längsschnitt zur Überprüfung der Leistungsentwicklung und Wirksamkeit von Interventionen dienen. Das übergeordnete Ziel von leistungsdiag-

nostischen Untersuchungen besteht jedoch darin, Informationen zu liefern, die zur Verbesserung der Wettkampfleistung der Sportler beitragen. Dabei müssen die zur Anwendung kommenden Testverfahren und Messgeräte bzw. die berechneten Parameter den wissenschaftlichen Gütekriterien genügen – insbesondere der Objektivität, Reliabili-

¹ Klinikum Osnabrück GmbH, Klinik für Orthopädie-, Unfall- und Handchirurgie, Osnabrück

² Bergische Universität Wuppertal, Arbeitsbereich Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Wuppertal

³ Forschungszentrum für Leistungsdiagnostik und Trainingsberatung (FLT), Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal

⁴ Hannover

tät und Validität (d.h. den Hauptgütekriterien) [19, 27].

Im Fußball wird die Wettkampfleistung eines Spielers bzw. einer Mannschaft durch zahlreiche psychologische Faktoren, technisch-taktische Fertigkeiten und konditionelle Fähigkeiten bestimmt [41]. Letztere werden aus didaktischen Gründen unterteilt in Ausdauer-, Kraft- und Schnelligkeitsfähigkeiten [25], die im Fokus des vorliegenden Beitrags stehen. Längsschnittstudien aus der Premier League belegen eine um bis zu 85 % zugenommene Spiellaufleistung mit hoher Intensität bzw. anaerober Stoffwechselbeanspruchung während der letzten Dekade [4, 23]. Ferner zeigen die Studien bezüglich der hochintensiven Spiellaufleistung abgenommene Unterschiede zwischen den Mannschaften [11]. Demnach sind im Hochleistungsfußball die konditionellen (anaeroben) Anforderungen gestiegen, und das Leistungsniveau ist homogener geworden. Schlussfolgernd haben leistungsdiagnostische Untersuchungen gegenwärtig einen höheren Stellenwert und einen anderen Schwerpunkt bezüglich des Energiestoffwechsels als um die Jahrtausendwende.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, einen narrativen Überblick bezüglich der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball zu geben.

Vergangenheit

Von etwa 1970 bis zur Jahrtausendwende lag der Fokus der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball auf den aeroben Ausdauerfähigkeiten der Spieler [25]. Als Testverfahren kamen zuerst Fahrrad- oder Laufbandergometrien unter Laborbedingungen [62] und später verschiedene Feldstufentests meistens auf einer 400-m-Tartanbahn [8] zum Einsatz. Mittels Atemgas- und Laktatanalysen wurden insbesondere die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_2\max$) und die Laufgeschwindigkeit an der anaeroben Schwelle (ANS) diagnostiziert [39]. Bereits 1992 wurde die externe Validität der beiden Parameter anhand derer Zusammenhänge zur Spiellaufleistung bei professionellen Fußballspielern untersucht: Obwohl die $VO_2\max$ und ANS hoch mit der Gesamtlaufstrecke korrelierten, bestanden nur

geringe bis moderate Zusammenhänge zur hochintensiven Laufstrecke [3]. 2000 und 2013 wurden Längsschnittstudien der deutschen und norwegischen Fußballnationalmannschaften veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die $VO_2\max$ und ANS der Spieler seit den 90er-Jahren statistisch nicht signifikant verändert haben [48, 59]. Als Ursache für die Ergebnisse musste die zusätzliche anaerobe Energiebereitstellung zur Realisierung der (vermehrten) hochintensiven Spiellaufleistung diskutiert werden [50], die bei Hochleistungsfußballspielern unabhängig von der Leistungsfähigkeit des aeroben Systems ist [42]. Folglich musste bereits vor der Jahrtausendwende die externe Validität der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball anhand der $VO_2\max$ und ANS hinterfragt werden.

Um die externe Validität zu erhöhen, wurden um die Jahrtausendwende vermehrt Feldtests angewandt. Hierzu zählten besonders Shuttle-Run-Tests auf einer 20-m-Laufstrecke (auch Beep-Tests genannt) und Sprintwiederholungstests über 20–40 m mit unvollständigen Pausen (auch Repeated-Sprint-Tests genannt) [19]. Die Shuttle-Run-Tests wurden zunächst mit kontinuierlich ansteigender Laufgeschwindigkeit durchgeführt (wie z.B. beim Multistage 20 m Shuttle-Run-Test [44]), später für eine fußballspezifischere Simulation des intervallartigen Charakters mit Gehpausen zwischen den Läufen (wie z.B. beim Interval-Shuttle-Run [45] oder Yo-Yo-Test [43]). Hinsichtlich der externen Validität konnten Studien einen hohen bis sehr hohen Zusammenhang zwischen der Leistung beim Yo-Yo-Test [43] und beim Sprintwiederholungstest [51] sowie der hochintensiven Spiellaufleistung bei Hochleistungsfußballspielern belegen, was auf die vermehrte anaerobe Energiebereitstellung während der Tests zurückgeführt werden konnte [43, 57]. Zusammenfassend konnten die Ergebnisse eine gesteigerte externe Validität der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball anhand der Shuttle-Run-Tests und Sprintwiederholungstests um die Jahrtausendwende belegen.

Im Fußball wird die Wettkampfleistung jedoch nicht nur von primär energetisch determinierten Ausdauer-, sondern auch von primär neuromuskulär determinierten Schnelligkeits- und

Kraftfähigkeiten sowie anthropometrischen Merkmalen beeinflusst [19, 25]. Während der letzten 10–15 Jahre wurden daher zusätzlich zu den Shuttle-Run-Tests und Sprintwiederholungstests oftmals Sprint- (z.B. Linear- und Richtungswechselsprints [16]), Sprung- (z.B. Counter Movement und Squat Jumps oder freie Sprünge [5]), Maximalkraft- (z.B. Bankrücken und Kniebeugen [33]) und Rumpfkrafttests (z.B. mit dem eigenen Körpergewicht [40]) sowie anthropometrische Messungen (z.B. bezüglich des Körpergewichts, -fetts und -wasseranteils [39]) im Rahmen von ganzen Testbatterien durchgeführt [25] – z.B. um geschlechtsspezifische Unterschiede im Hochleistungsfußball herauszuarbeiten [17]. Für die additive Diagnostik von technischen Fertigkeiten – z.T. unter konditioneller Belastung – wurden schließlich sog. Komplextests entwickelt. Bei diesen wird mehrmals ein Parcours durchlaufen, der z.B. aus unterschiedlichen Sprint-, Jogging- und Dribblingabschnitten ohne bzw. mit Ball sowie Sprüngen, Pässen und Torabschlüssen besteht. Als Beispiele sind der Hoff-Track- [34] und BEAST90-Test [61] zu nennen, wobei deren externe Validität bei Hochleistungsfußballspielern noch nicht untersucht wurde und die Ableitung von konkreten Trainingsempfehlungen aufgrund der multifaktoriell determinierten Testleistungen schwierig ist. Insgesamt konnte ein Bestreben zu spielnäheren Testverfahren mit mehrdimensionalen konditionellen und zusätzlichen technischen Anforderungen im Hochleistungsfußball während der letzten 10–15 Jahre verzeichnet werden.

Als Messtechnologien kamen bis vor ca. 5 Jahren überwiegend Ergometer, Atemgas-, Herzfrequenz- und Laktatanalysegeräte, Lichtschranken sowie Kontakt- und Kraftmessplatten zur Anwendung [19, 25, 47, 58]. Problematisch bei diesen Technologien war, dass diese aufgrund ihrer unzureichenden Validität (z.B. bezüglich der Prognostik der $VO_2\max$ und ANS für die hochintensive Spiellaufleistung) und Praktikabilität (z.B. bezüglich der Anwendung von Lichtschranken und Kraftmessplatten bei Komplextests) für den Hochleistungsfußball keine Weiterentwicklung hin zu spielnäheren Tests erlaubten. Etwa 2010 erfolgte schließlich ein messtechnologischer Durchbruch: Ur-

sprünglich für militärische Zwecke entwickelt, konnte das Global Positioning System (GPS; d.h. ein satellitengestütztes Ortungssystem) so modifiziert werden (u.a. bezüglich der Messgenauigkeit, Speicherkapazität und Algorithmen), dass dieses im Hochleistungsfußball routinemäßig eingesetzt werden konnte [2]. Von dem Zeitpunkt an konnten zur konditionellen Leistungsdiagnostik erstmalig auch unterschiedliche Spielformen [29] und Testspiele [38] untersucht werden. Ende 2015 änderte die FIFA schließlich das Regelwerk [24], sodass zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball auf das extern valideste Testverfahren zurückgegriffen werden konnte, was ohne empirische Evidenz aber logischerweise Pflichtspiele sind. Resümiert werden kann, dass seit 1970 die Testverfahren zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball extern valider bzw. spezifischer geworden sind – gemäß dem Leitbild „from the laboratory to the terrain“ [22] –, was eng an dem messtechnologischen Fortschritt geknüpft war. Abbildung 1 veranschaulicht die Vergangenheit bzw. Entwicklung der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball hinsichtlich der angewandten Testverfahren und notwendigen Messtechnologien von 1970 bis zur Gegenwart.

Gegenwart

Gegenwärtig können zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball unterschiedliche Ortungssysteme eingesetzt werden [14, 37]. Zu den 3 gängigsten Ortungssystemen gehören:

1. (semi-)automatische videobasierte Kamerasysteme,
2. globale Navigationssatellitensysteme (wie z.B. das GPS) und
3. lokale funkbasierte Systeme [37, 46].

Tabelle 1 stellt die messtechnischen Hintergründe, Einflussfaktoren, Vor- und Nachteile, Analyseebenen und Anwendungsbereiche den 3 verschiedenen Ortungssystemen gegenüber. Deutlich wird, dass diese auf verschiedenen Messtechniken beruhen (d.h. bildbasierte Mustererkennung, Empfang von Zeitsignalen aus dem Weltraum und Sendung von Zeitsignalen zu Referenzantennen in der lokalen Umgebung) und

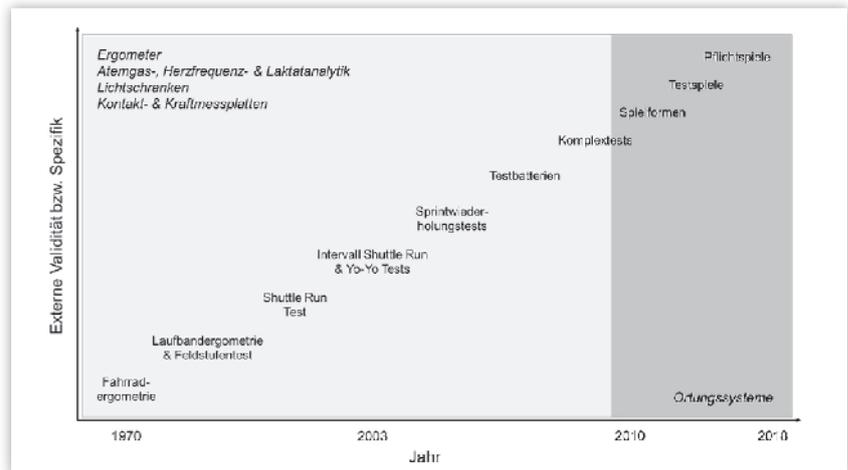


Abbildung 1 Vergangenheit bzw. Entwicklung der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball hinsichtlich der angewandten Testverfahren und notwendigen Messtechnologien von 1970 bis zur Gegenwart

demnach auch von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst werden (z.B. Position der Spieler auf dem Spielfeld, verfügbare Anzahl und geometrische Anordnung der Satelliten sowie Umgebungsbedingungen wie Wetter, Gebäude, und Baumaterialien), die für valide Datenerhebungen berücksichtigt werden müssen [36, 37, 46]. Aus den unterschiedlichen Messtechniken und Einflussfaktoren ergeben sich verschiedene Vor- und Nachteile (z.B. Notwendigkeit einen Sensor am Spieler zu applizieren, Erfassung des Spielballs und Messgenauigkeit), Analyseebenen (d.h. konditionell wie Laufstrecken, technisch-taktisch wie Passquoten und Abstände sowie qualitativ wie Zweikampverhalten) und Anwendungsbereiche (d.h. Wettkampf, Training und Wissenschaft) [37, 46], die bei der Wahl eines Ortungssystems zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball berücksichtigt werden müssen [36].

Die mittels Ortungssystemen erhobene Geschwindigkeitsdaten (Tab. 1; messtechnische Hintergründe) können nach einer entsprechenden Filterung zur Berechnung von weiteren Größen herangezogen werden [36]. Dazu gehören im Rahmen der konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball traditionellerweise die Gesamtlaufstrecke, die maximale Laufgeschwindigkeit sowie die Laufstrecken und Zeiten in definierten Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsbereichen [18, 56]. Darüber hinaus erlauben innovative Algo-

rithmen aus den Geschwindigkeitsdaten und zeitgleich erhobene Herzfrequenzen die folgenden weiteren Größen näherungsweise zu berechnen:

1. die mechanische Leistung,
2. die konzentrische und exzentrische Muskelarbeit,
3. die metabolische Leistung,
4. den Wirkungsgrad,
5. den Energieverbrauch,
6. die aerobe und die anaerobe Energiebereitstellung sowie
7. das Schlag- und Herzzeitvolumen [36].

Die notwendigen Filtertechniken und Algorithmen, den leistungsphysiologischen Hintergrund und Mehrwert der innovativen im Vergleich zu den traditionellen Größen sowie Beispiele aus den Mannschafts- und Rückschlagsportarten haben wir kürzlich an anderer Stelle ausführlich beschrieben [36]. Schlussfolgernd können mittels Ortungssystemen und innovativen Algorithmen gegenwärtig nicht nur die äußeren biomechanischen Belastungen (z.B. Gesamtlaufstrecke, mechanische Leistung, exzentrische Muskelarbeit), sondern auch die inneren metabolischen Beanspruchungen (z.B. metabolische Leistung, Energieverbrauch, aerobe und anaerobe Energiebereitstellung) der Spieler unter extern validen Bedingungen während Pflichtspielen zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball herangezogen werden.

Basierend auf den Pflichtspieldaten können zunächst Profile bzw. Soll-Werte für die Spieler erstellt werden (z.B.

	Videobasierte Kamerasysteme	Globale Navigations-satellitensysteme	Lokale funkbasierte Systeme
Messtechnische Hintergründe	<ul style="list-style-type: none"> Videokameras erfassen Bilder des Spielfelds, und Mustererkennungsalgorithmen detektieren (semi-)automatisch die Spieler. Bestimmung der relativen x-,y-Koordinaten (d.h. in Relation zu den Videokameras) der Spieler durch ein modelliertes Koordinatensystem auf Grundlage des Spielfelds und der Kamerapositionen Bestimmung der Laufgeschwindigkeiten der Spieler durch Differenzierung der x-,y-Koordinaten 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor am Spieler empfängt Zeitsignale von Satellitensystemen (z.B. des Global Positioning Systems; GPS) aus dem Weltraum (d.h. „globale“ Signalübertragung). Bestimmung der absoluten x-,y-Koordinaten (d.h. der geografischen) der Spieler durch Triangulation, wofür die Zeitsignale von mindestens 4 Satelliten notwendig sind Bestimmung der Laufgeschwindigkeiten der Spieler durch Differenzierung der x-,y-Koordinaten oder gegenwärtig vermehrt auf Basis des Doppler-Effekts 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor am Spieler funkt Zeitsignale zu Referenzantennen am Spielfeldrand (d.h. „lokale“ Signalübertragung). Bestimmung der relativen x-,y-Koordinaten (d.h. in Relation zu den Referenzantennen) der Spieler durch Triangulation, wofür die Zeitsignale zu mindestens 3 Referenzantennen notwendig sind Bestimmung der Laufgeschwindigkeiten der Spieler durch Differenzierung der x-,y-Koordinaten
Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> Position der Spieler in Relation zu den Kameras Überlappung von Spielern (z.B. bei Zweikämpfen) Sonnenlicht und Nebel 	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der verfügbaren Satelliten und deren geometrische Anordnung (d.h. Tageszeit und Ort) Hohe Objekte in der unmittelbaren Umgebung (z.B. Stadionwände und -dächer sowie Häuser und Bäume) Wolken und Regen 	<ul style="list-style-type: none"> Position des Sensors in Relation zu den Referenzantennen Bestimmte Baumaterialien in der unmittelbaren Umgebung (z.B. Stahlkonstruktionen)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Kein Sensor am Spieler notwendig Zusätzliche Erfassung der x-,y-Koordinaten des Balls möglich Zusätzliche Erfassung der x-,y-Koordinaten des Gegners möglich Qualitativer Kontext durch das Videobild vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> Keine weitere Hardware (z.B. Referenzantennen und Kabel) notwendig Automatische Auswertung der Messdaten (d.h. zeitnahe Ergebnisse) Kopplung mit weiteren Sensoren (z.B. Inertial- und Herzfrequenzsensoren) möglich, da Speichermedium in der Hardware vorhanden ist 	<ul style="list-style-type: none"> Messgenauigkeit der x-,y-Koordinaten der Spieler und der daraus berechneten Laufgeschwindigkeiten Zusätzliche Erfassung der x-,y-Koordinaten des Balls möglich, wofür ein Sensor in diesen integriert werden muss Automatische Auswertung der Messdaten (d.h. zeitnahe Ergebnisse) Messungen sind outdoor (z.B. im Stadion und auf dem Trainingsplatz) und indoor (z.B. in einer Halle) möglich Kopplung mit weiteren Sensoren (z.B. Inertial- und Herzfrequenzsensoren) möglich, da Funkverbindung zum PC vorhanden Komplettes Stand-alone-System für Wettkampf- und Trainingsdiagnostik, wenn Videobild für den qualitativen Kontext eingespeist wird
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Fixe Installation der Kameras, Kabel etc. notwendig Manuelle Korrekturen der Messdaten notwendig (d.h. keine zeitnahen Ergebnisse) Keine Kopplung mit weiteren Sensoren (z.B. Inertial- und Herzfrequenzsensoren) möglich, da keine Hardware am Spieler vorhanden ist 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor am Spieler notwendig (ca. 80 g) Für technisch-taktische Analysen unzureichende Messgenauigkeit der absoluten x-,y-Koordinaten der Spieler, wobei die Messgenauigkeit der Laufgeschwindigkeiten akzeptabel ist Keine Erfassung der x-,y-Koordinaten des Balls möglich Keine Erfassung der x-,y-Koordinaten des Gegners ohne weitere Sensoren etc. möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor am Spieler notwendig, jedoch in miniaturisierter Form (ca. 15 g), da kein Speichermedium etc. in der Hardware benötigt wird Referenzantennen notwendig, die fix installiert (z.B. im Stadion und auf dem Haupttrainingsplatz) oder variabel aufgebaut (z.B. im Trainingslager) werden müssen Keine Erfassung der x-,y-Koordinaten des Gegners ohne weitere Sensoren etc. möglich
Analyseebenen	<ul style="list-style-type: none"> Konditionell (z.B. Laufstrecken) Technisch-taktisch (z.B. Passquoten und Abstände) Qualitativ (z.B. Zweikampfvorhalten) 	<ul style="list-style-type: none"> Konditionell (z.B. Laufstrecken) 	<ul style="list-style-type: none"> Konditionell (z.B. Laufstrecken) Technisch-taktisch (z.B. Passquoten, Abstände)
Anwendungsbereiche	<ul style="list-style-type: none"> Pflichtspiele im Stadion Wettkampfdiagnostik z.B. für das „Profiling“ der Spieler sowie für die technisch-taktische Spielvorbereitung und -nachbereitung Scouting 	<ul style="list-style-type: none"> Testspiele, Individual- und Mannschaftstraining sowie Rehabilitation auf wechselnden Plätzen (z.B. auf dem Vereinsgelände und im Trainingslager) mit Ausnahme von großen Stadien Monitoring des täglichen Trainings für das „Belastungsmanagement“ 	<ul style="list-style-type: none"> Pflichtspiele im Stadion Testspiele, Individual- und Mannschaftstraining sowie Rehabilitation auf ausgewählten Plätzen (z.B. fixe Installation im Stadion und auf Haupttrainingsplatz sowie variabler Aufbau im Nachwuchsleistungszentrum und Trainingslager) Wettkampfdiagnostik z.B. für das „Profiling“ der Spieler sowie für die technisch-taktische Spielvorbereitung und -nachbereitung Monitoring des täglichen Trainings für das Belastungsmanagement Wissenschaftliche Fragestellungen, bei denen eine hohe Messgenauigkeit erforderlich ist

Tabelle 1 Messtechnische Hintergründe, Einflussfaktoren, Vor- und Nachteile, Analyseebenen und Anwendungsbereiche der 3 gängigsten Ortungssysteme zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball

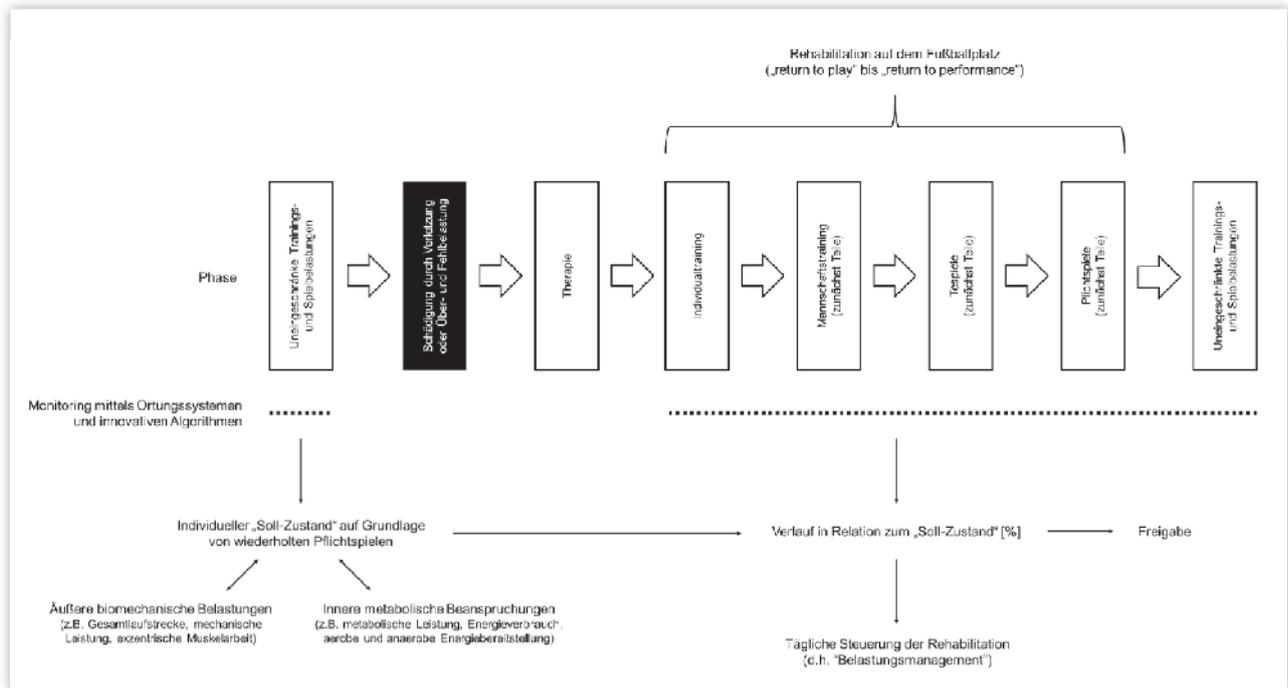


Abbildung 2 Ansatz zum Monitoring der Rehabilitation auf dem Fußballplatz mittels Ortungssystemen und innovativen Algorithmen im Hochleistungsfußball

bezüglich Alter [15], Geschlecht [13], Leistungsniveau [12] und Spielposition [23]). Aufgrund der Variabilität der Spieldaten (u.a. bedingt durch Spielstrategien bzw. Taktik, Gegner, Spielstand, Trainings- und Gesundheitszustand, Ermüdung bzw. Pacing, Motivation, Wetter und Reliabilität der Messtechnologie) [14, 31, 41] müssen jedoch zur Gewährleistung der Validität der Soll-Werte zwingend mehrere Spiele erfasst und analysiert werden [38]. Analog zum Vorgehen mittels traditioneller Testverfahren und Messtechnologien (z.B. mittels Sprinttests und Lichtschranken) können schließlich die aktuellen Ist-Werte der Spieler im Abgleich mit den Soll-Werten für eine Optimierung des Trainings bzw. Verbesserung der Wettkampfleistung herangezogen werden. Über dieses leistungsdiagnostische Anwendungsfeld hinaus können Ortungssysteme und innovative Algorithmen im Hochleistungsfußball auch für das tägliche Monitoring des Trainings (d.h. für das Belastungsmanagement) genutzt werden [14, 36]. Hierfür hat es sich in der Trainingspraxis des Hochleistungsfußballs etabliert, die täglichen biomechanischen Belastungen und metabolischen Beanspruchungen der Spieler

bzw. gesamten Mannschaft für eine bessere Einordnung prozentual in Relation zu den Pflichtspieldaten (d.h. der Soll-Werte) zu analysieren. Da mittlerweile die mittels Ortungssystemen und innovativer Algorithmen erhobenen Größen bereits während des Trainings auf einem Laptop, Tablet oder Handy in Realtime mitverfolgt werden können, kann das Training beim Überschreiten von zuvor definierten Zielen (z.B. bezüglich der exzentrischen Muskelarbeit oder anaeroben Energiebereitstellung) abgebrochen bzw. unverzüglich oder am nächsten Tag modifiziert werden. Solch ein verbessertes Belastungsmanagement des Trainings im Hochleistungsfußball kann nicht nur Regenerations- und Anpassungsprozesse der Spieler optimieren [60], sondern auch zur Prävention von Verletzungen beitragen [28] – insbesondere unter Ermüdung [32] oder nach bereits vorhandenen Vorverletzungen durch das Verhindern von Fehl- und Überbelastungen [54].

Zukunft

Auf die zukünftigen technologischen Entwicklungsmöglichkeiten von Or-

tungssystemen und innovativen Algorithmen zur konditionellen Leistungsdiagnostik (z.B. zur Erfassung der Sprunghöhen oder energetischen Substraten in Kombination mit Biosensoren) sowie zur Analyse von technisch-taktischen Fertigkeiten (z.B. zur Erfassung von Abständen zwischen dem Fuß und Ball bzw. den Spielern) und Bewegungen (z.B. zur Erfassung von Gelenkwinkeln in Kombination mit Inertialsensoren) haben wir kürzlich schon an anderer Stelle hingewiesen [36]. Daher soll hier auf die zukünftigen Entwicklungspotenziale im Bereich der Datenanalytik und auf ein neues Anwendungsfeld von Ortungssystemen und innovativen Algorithmen im Hochleistungsfußball hingewiesen werden.

Gegenwärtig werden konditionelle Fähigkeiten wie z.B. die hochintensive Spielaufleistung im Hochleistungsfußball meist aus einer isolierten leistungsphysiologischen Perspektive betrachtet. Unbestritten ist aber, dass jede hochintensive Spielhandlung einen technisch-taktischen Kontext hat (z.B. Ballverlust, Konter oder Pressing). Folglich wird es zukünftig notwendig sein, auch um die Akzeptanz von Ortungssystemen und innovativen Algo-

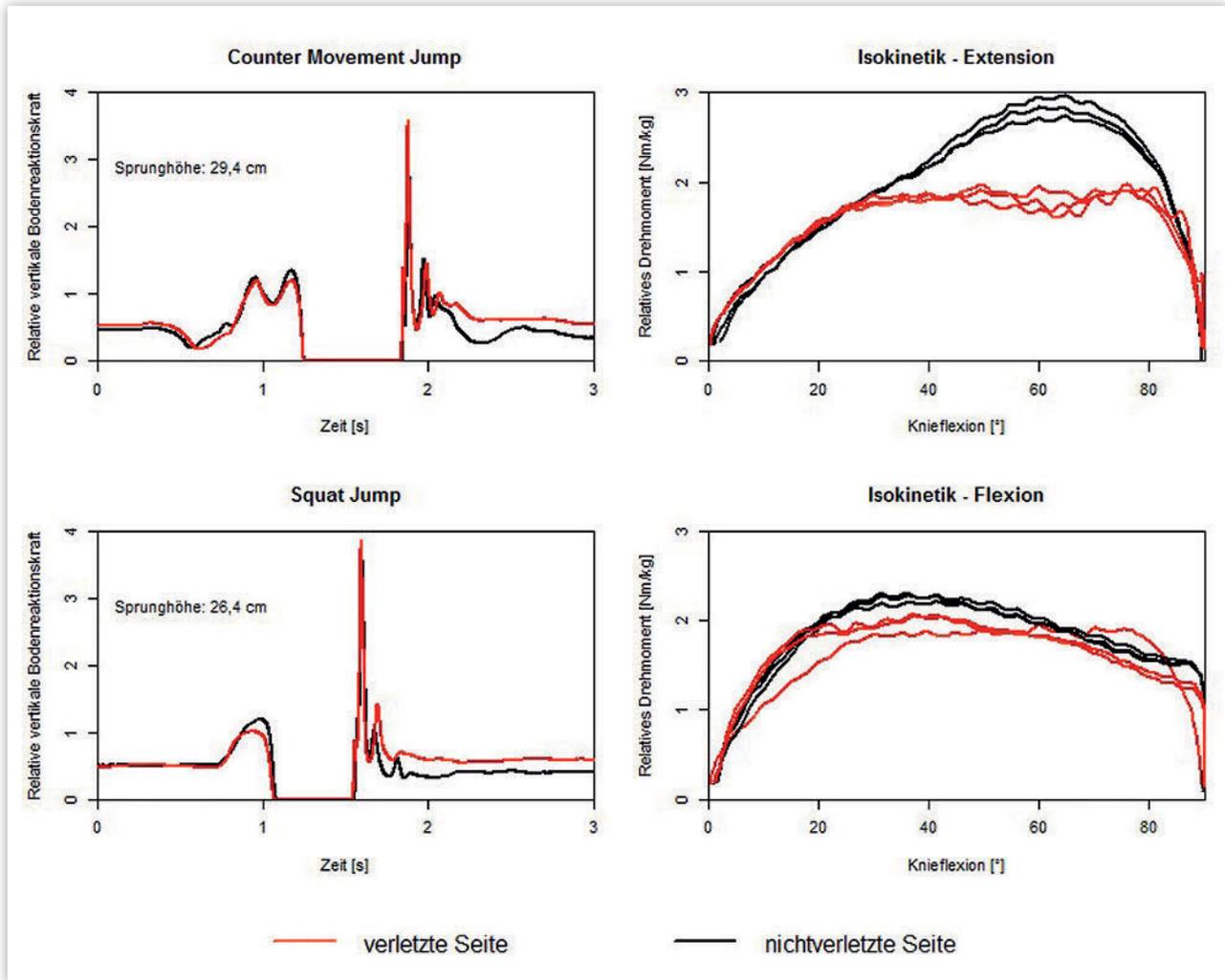


Abbildung 3 Vertikale Bodenreaktionskräfte während eines Counter Movement und Squat Jumps auf 2 getrennten Kraftmessplatten (links) sowie Drehmomente der Knieextensoren und -flexoren während einer isokinetischen Testung mit einer Winkelgeschwindigkeit von 60°/s (rechts) im Seitenvergleich. Die Daten stammen von einem 28 Jahre alten Fußballspieler mit u.a. 3 operativ versorgten Knorpelschäden des Kniegelenks. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung kam der Spieler regelmäßig in der Bundesliga, Champions League und Nationalmannschaft zum Einsatz. Weitere Details sind dem Text zu entnehmen.

rithmen zur konditionellen Leistungsdiagnostik bei Praktikern zu erhöhen, die Spielaufleistung im jeweiligen technisch-taktischen Kontext zu analysieren [10], was wir bereits im Tennis ansatzweise umsetzen konnten [35]. Um solche integrativen Ansätze in der Fußballpraxis und -forschung realisieren zu können, werden zukünftig aufgrund der Datenkomplexität sog. Big-Data-Ansätze zum Datenmanagement und „maschinelles Lernen“ zur Mustererkennung notwendig sein [53]. Über diesen integrativen Ansatz hinaus erscheint es grundsätzlich zukunftsweisend, technisch-taktische Fertigkeiten im Hochleistungsfußball vermehrt quantitativ zu analysieren [49, 55], da

diese bereits gegenwärtig stärker zwischen den Mannschaften diskriminieren und enger mit dem Spielerfolg korrelieren als konditionelle Fähigkeiten wie z.B. die hochintensive Spielaufleistung [41].

Ein bis dato weitestgehend übersehenes Anwendungsfeld von Ortungssystemen und innovativen Algorithmen im Hochleistungsfußball ist das Monitoring der Rehabilitation nach Verletzungen auf dem Fußballplatz [26, 36]. Gegenwärtig sind im Rahmen der Rehabilitation u.a. 2 Aspekte problematisch:

1. die Entscheidungsfindung, ab wann uneingeschränkte Trainings- und Spielbelastungen wieder möglich sind [30] und

2. eine unzureichende Steuerungsmöglichkeit der Rehabilitation auf dem Fußballplatz aufgrund fehlender objektiver Informationen bezüglich der (spezifischen) augenblicklichen bzw. täglichen Belastungen und Beanspruchungen [52].

Zur Problemlösung haben wir einen Ansatz zum Monitoring der Rehabilitation auf dem Fußballplatz mittels Ortungssystemen und innovativer Algorithmen im Hochleistungsfußball entwickelt: Der Ansatz berücksichtigt die Phase ab dem „return to play“ (d.h. der Rückkehr zum Fußball mit reduzierter Leistungsfähigkeit) bis zur „return to performance“ (d.h. der Rückkehr zu Pflichtspielen mit fast vollständiger Leistungsfähigkeit).

dig wiederhergestellter Leistungsfähigkeit) [1]. Auch das Monitoring der Rehabilitation basiert auf einem Abgleich zwischen dem aktuellen Ist-Zustand in Relation zum (verletzungsfreien) Soll-Zustand, welcher auch auf wiederholten Messungen von Pflichtspielen beruht.¹ Hierdurch kann der Verlauf der Rehabilitation anhand der Veränderungen der (tolerierten) Belastungen und Beanspruchungen überwacht werden, was die tägliche Steuerung der Rehabilitation optimieren könnte. Anhand von individuell definierten Schwellwerten könnte schließlich – im Abgleich mit der medizinischen Abteilung sowie der subjektiven Einschätzung des Spielers und Trainers [26] – die Freigabe zu uneingeschränkten Trainings- und Spielbelastungen zukünftig auf einer objektiveren Basis als bis dato erfolgen. Im Hochleistungsfußball erfolgen schwerwiegende Verletzungen wie z.B. die Ruptur des vorderen Kreuzbands oftmals während exzentrischer Muskelarbeit (z.B. während Richtungswechseln oder Sprüngen [20]) [9]. Ursächlich hierfür sind möglicherweise die hohen mechanischen Kräfte [6] und der feinmotorische Kontrollverlust [21] während der exzentrischen Arbeitsweise der Muskulatur, weshalb während der Rehabilitation häufig exzentrische Situationen antizipativ vermieden werden [7, 25]. Daher ist zur täglichen Steuerung der Rehabilitation auf dem Fußballplatz sowie zur Freigabe zu uneingeschränkten Trainings- und Spielbelastungen möglicherweise insbesondere ein ortonungssystembasierter Exzentrik-Index geeignet. Diesen haben wir kürzlich global (d.h. für den Körperschwerpunkt) hergeleitet und veranschaulicht [36]. Zukünftig ist es denkbar, diesen globalen Exzentrik-Index mittels mehrerer Inertialsensoren z.B. an Femur und Tibia auf die kniegelenksumgebende Muskulatur weiter zu spezifizieren. Abbildung 2 zeigt den von uns vorgeschlagenen Ansatz zum Monitoring der Rehabilitation auf dem Fußballplatz mittels Ortungssystemen und innovativen Algorithmen im Hochleistungsfußball.

Ergänzend sollten in das Monitoring der Rehabilitation auf dem Fußballplatz wiederholte Testbatterien zur konditio-

nellen Leistungsdiagnostik integriert werden, um die Wiedererlangung der konditionellen Leistungsfähigkeit auch unter standardisierten Bedingungen objektivieren zu können. Dabei sollten die zur Anwendung kommenden Testverfahren und Messtechnologien zukünftig nicht nur Rückschlüsse auf die konditionelle Leistungsfähigkeit, sondern auch auf möglicherweise zugrundeliegende orthopädische Probleme des Spielers erlauben [26, 27]. Zur Verdeutlichung wird folgender Kaser vorgestellt: Ein 28 Jahre alter Fußballspieler mit regelmäßigen Einsätzen in der Bundesliga, Champions League und Nationalmannschaft stellte sich zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Forschungszentrum für Leistungsdiagnostik und Trainingsberatung (FLT) der Bergischen Universität Wuppertal vor. Der Spieler bat um individuelle Trainingsempfehlungen für die Sommerpause zum Erhalt bzw. Ausbau seiner konditionellen Leistungsfähigkeit. Der Spieler wies folgende Befunde bzw. Verletzungshistorie auf: Vor ca. 7,5 Jahren verletzte sich der Spieler am Kniegelenk bei einer Schussaktion bzw. Hyperextension ohne Fremdeinwirkung während eines Pflichtspiels. Infolgedessen und während den folgenden 3,5 Jahren wurden mehrere Chondromalazien Grad IV (Bereiche: Trochlea, retropatellar und medialer Femurcondylus), ein freier intraartikulärer Gelenkkörper (Knorpelfragment), eine Laxität des vorderen Kreuzbands Grad II, eine Synovitis und eine massive infrapatellare Vernarbung diagnostiziert, die 3-mal operativ versorgt werden mussten (u.a. mittels arthroskopischer Mikrofrakturierung, Entfernung des Gelenkkörpers, Synovektomie und Narbenlösung). In den vergangenen 2,5 Jahren konnte der Spieler wieder weitestgehend uneingeschränkt am Mannschaftstraining teilnehmen und die meisten Pflichtspiele absolvieren. Im Rahmen der durchgeführten konditionellen Kraftdiagnostik wurden 2 getrennte Kraftmessplatten zur Erfassung der vertikalen Bodenreaktionskräfte während standardisierten Sprüngen und ein isokinetischer Kraftmessstuhl zur Erfassung der Drehmomente der kniegelenksumgebenden Muskulatur eingesetzt. Ferner wurden die Oberschenkelumfän-

ge sowie die Beweglichkeit der Knie- und Hüftgelenke erhoben. Die Abbildung 3 zeigt die vertikalen Bodenreaktionskräfte während eines Counter Movement und Squat Jumps sowie die Drehmomente der Knieextensoren und -flexoren bei einer Winkelgeschwindigkeit von 60°/s im Seitenvergleich. Die wesentlichen Ergebnisse lauten:

1. In Relation zu Soll-Werten aus der Bundesliga sind die Sprunghöhen unterdurchschnittlich.
2. Die Bodenreaktionskräfte sind auf der verletzten Seite während des Squat Jumps beim Absprung vermindert.
3. Die Drehmomente der Knieextensoren und -flexoren sind auf der verletzten Seite während der isokinetischen Testungen vermindert – am meisten die Knieextensoren bei einem Flexionswinkel zwischen 30 und 80°.
4. Die Oberschenkelumfänge sind auf der verletzten Seite um bis zu 4,2 cm reduziert.
5. Die Beweglichkeit des Kniegelenks ist auf der verletzten Seite um 10° in der Flexion eingeschränkt.

Basierend auf den unterdurchschnittlichen Sprunghöhen könnten dem Spieler bei einer konventionellen Vorgehensweise (d.h. einer auf Defiziten orientierten) zunächst ein Sprung- und Maximalkrafttraining sowie plyometrische Übungen empfohlen werden. Da die Ergebnisse aber auch auf neuromuskuläre Hemmungen der Knieextensoren in zentralen Gelenkwinkelbereichen auf der verletzten Seite hinweisen, was insbesondere auf die vorhandenen Knorpelschäden zurückzuführen ist, wurden die globalen Trainingsempfehlungen weiter spezifiziert: Dem Spieler wurde ein isokinetisches Maximalkrafttraining im Bereich zwischen 0 und 30° Knieflexion empfohlen, um einerseits die kniegelenksumgebende Muskulatur auf der verletzten Seite aufzubauen und andererseits den geschädigten Knorpel zu schonen bzw. keine weiteren Schädigungen zu provozieren (z.B. durch vertikale Kompressionsbelastungen bei Sprüngen, retropatellare Druckbelastungen bei tiefen Kniebeugen und generell hohe mechanische Belastungen während exzentrischer Muskelarbeit bei plyometrischen Übungen). Aufgrund der Schwere der Verletzung stand bei dem Spieler somit keine

¹ Aufgrund der Schwere von bestimmten Verletzungen und des operativen Eingriffs (z.B. einer Ruptur bzw. Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands) kann sich der Soll-Zustand eines Spielers während seiner Karriere verändern, da in der Regel keine vollständige Wiederherstellung erfolgt [30].

Steigerung der konditionellen Leistungsfähigkeit, sondern der Erhalt bzw. die Vermeidung eines weiteren Leistungsabfalls im Vordergrund. Zusammenfassend zeigt der Kasus, dass zukünftig eine noch engere Verzahnung der konditionellen Leistungsdiagnostik mit orthopädisch-funktionsdiagnostischen Aspekten im Hochleistungsfußball für eine weitere Optimierung des Trainings bzw. der Rehabilitation notwendig ist.

Schlussfolgerungen

Zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball können gegenwärtig extern validere bzw. spezifischere

Testverfahren herangezogen werden als in den 70er-Jahren. Ursächlich hierfür ist der messtechnologische Fortschritt. State of the Art zur konditionellen Leistungsdiagnostik im Hochleistungsfußball sind Ortungssysteme und innovative Algorithmen. Zukünftig werden diese auch Analysen von technisch-taktischen Fertigkeiten und Bewegungen erlauben. Weitere Entwicklungspotenziale bestehen im Bereich der Datenanalytik im Rahmen von integrativen Ansätzen und in der Anwendung zum Monitoring der Rehabilitation nach Verletzungen auf dem Fußballplatz. Hinsichtlich der Rehabilitation wird zukünftig eine noch engere Verzahnung der konditionellen Leistungsdiagnostik mit

orthopädisch-funktionsdiagnostischen Aspekten notwendig sein. Bei allem messtechnologischen Fortschritt wird jedoch weiterhin die trainingswissenschaftliche und medizinische Expertise der handelnden Personen für den Erfolg im Hochleistungsfußball entscheidend bleiben. OUP

Interessenkonflikt: Keine angegeben.

Korrespondenzadresse

Dr. rer. nat. Matthias W. Hoppe
Klinikum Osnabrück GmbH, Klinik für
Orthopädie-, Unfall- und Handchirurgie
Am Finkenhügel 1
49076 Osnabrück
matthias.hoppe@klinikum-os.de

Literaturverzeichnis

1. Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A et al.: 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *Br J Sports Med* 2016; 50: 853–64
2. Aughey RJ: Applications of GPS technologies to field sports. *Int J Sports Physiol Perform* 2011; 6: 295–310
3. Bangsbo J, Lindquist F: Comparison of various exercise tests with endurance performance during soccer in professional players. *Int J Sports Med* 1992; 13: 125–32
4. Barnes C, Archer DT, Hogg B, Bush M, Bradley PS: The evolution of physical and technical performance parameters in the English Premier League. *Int J Sports Med* 2014; 35: 1095–100
5. Baumgart C, Honisch F, Freiwald J, Hoppe MW: Differences and trial-to-trial reliability of vertical jump heights assessed by ultrasonic system, forceplate, and high-speed video analyses. *Asian J Sports Med* 2017; 8: 1–6
6. Baumgart C, Hoppe MW, Freiwald J: Phase-specific ground reaction force analyses of bilateral and unilateral jumps in patients with ACL reconstruction. *Orthop J Sports Med* 2017; 5: 2325967117710912
7. Baumgart C, Schubert M, Hoppe MW, Gokeler A, Freiwald J: Do ground reaction forces during unilateral and bilateral movements exhibit compensation strategies following ACL reconstruction? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; 25: 1385–94
8. Bisanz G, Gerisch G: *Fussball – Kondition, Technik & Coaching*. Aachen: Meyer & Meyer, 2008
9. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Jr., Garrett WE, Jr.: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics* 2000; 23: 573–8
10. Bradley PS, Ade JD: Are current physical match performance metrics in elite soccer fit for purpose or is the adoption of an integrated approach needed? *Int J Sports Physiol Perform* 2018; 13: 656–64
11. Bradley PS, Archer DT, Hogg B, et al.: Tier-specific evolution of match performance characteristics in the English Premier League: it's getting tougher at the top. *J Sports Sci* 2016; 34: 980–7
12. Bradley PS, Carling C, Gomez Diaz A, et al.: Match performance and physical capacity of players in the top three competitive standards of English professional soccer. *Hum Mov Sci* 2013; 32: 808–21
13. Bradley PS, Dellal A, Mohr M, Castellano J, Wilkie A: Gender differences in match performance characteristics of soccer players competing in the UEFA Champions League. *Hum Mov Sci* 2014; 33: 159–71
14. Buchheit M, Allen A, Poon TK, Modonutti M, Gregson W, Di Salvo V: Integrating different tracking systems in football: multiple camera semi-automatic system, local position measurement and GPS technologies. *J Sports Sci* 2014; 32: 1844–57
15. Buchheit M, Mendez-villanueva A, Simpson BM, Bourdon PC: Repeated-sprint sequences during youth soccer matches. *Int J Sports Med* 2010; 31: 709–16
16. Cardoso de Araujo M, Baumgart C, Freiwald J, Hoppe MW: Nonlinear sprint performance differentiates professional from young soccer players. *J Sports Med Phys Fitness* 2017
17. Cardoso de Araujo M, Baumgart C, Jansen CT, Freiwald J, Hoppe MW: Sex differences in physical capacities of German Bundesliga soccer players. *J Strength Cond Res* 2018
18. Carling C, Bloomfield J, Nelsen L, Reilly T: The role of motion analysis in elite soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Med* 2008; 38: 839–62
19. Carling C, Reilly T, Williams AM: *Performance assessment for field sports*. 1. Aufl., New York: Routledge, 2009
20. David S, Komnik I, Peters M, Funken J, Potthast W: Identification and risk estimation of movement strategies during cutting maneuvers. *J Sci Med Sport* 2017; 20: 1075–80
21. De Ste Croix MB, Priestley AM, Lloyd RS, Oliver JL: ACL injury risk in elite female youth soccer: changes in neuromuscular control of the knee following soccer-specific fatigue. *Scand J Med Sci Sports* 2015; 25: 531–8
22. di Prampero PE: GPEXE – The power tracker. www.gpexe.comteam/; 29.10.2017
23. Di Salvo V, Gregson W, Atkinson G, Tordoff P, Drust B: Analysis of high intensity activity in Premier League soccer. *Int J Sports Med* 2009; 30: 205–12
24. FldF A: Approval of electronic performance and tracking system (EPTS) devices. Zurich: Federation Internationale de Football Association, 2015
25. Freiwald J, Baumgart C, Hoppe M, Jansen C, Cardoso M, Schneider U: Ressourcenmodell, Leistungsdiagnostik und Training der konditionellen Fähigkeiten im Frauen- und Männerfußball. *SportOrthoTrauma* 2011; 27: 27–34
26. Freiwald J, Baumgart C, Hoppe MW et al.: Return to Sport nach Verletzungen

- im Hochleistungsfußball – was ist dazu notwendig? *Sport Orthop. Traumatol.* 2013; 29: 4–12
27. Freiwald J, Brexendorf B, Pieper S, Baumgart C, Slomka M, Papadopoulos C: Leistungs- und Funktionsdiagnostik im Hochleistungsfußball – Präventives Screeningverfahren für Über- und Fehlbelastungen sowie Übertraining. *Sport-OrthoTrauma* 2008; 24: 20–30
 28. Gabbett TJ: The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med* 2016; 50: 273–80
 29. Gaudino P, Alberti G, Iaia FM: Estimated metabolic and mechanical demands during different small-sided games in elite soccer players. *Hum Mov Sci* 2014; 36: 123–33
 30. Gokeler A, Dingenen B, Mouton C, Seil R: Clinical course and recommendations for patients after anterior cruciate ligament injury and subsequent reconstruction: a narrative review. *EFORT Open Rev* 2017; 2: 410–20
 31. Gregson W, Drust B, Atkinson G, Salvo VD: Match-to-match variability of high-speed activities in premier league soccer. *Int J Sports Med* 2010; 31: 237–42
 32. Halson SL: Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med* 2014; 44: 139–47
 33. Hoff J, Helgerud J: Endurance and strength training for soccer players: physiological considerations. *Sports Med* 2004; 34: 165–80
 34. Hoff J, Wisloff U, Engen LC, Kemi OJ, Helgerud J: Soccer specific aerobic endurance training. *Br J Sports Med* 2002; 36: 218–21
 35. Hoppe MW, Baumgart C, Freiwald J: Do running activities of adolescent and adult tennis players differ during play? *Int J Sports Physiol Perform* 2016; 11: 793–801
 36. Hoppe MW, Baumgart C, Freiwald J: Estimating external loads and internal demands by positioning systems and innovative data processing approaches during intermittent running activities in team and racquet sports. *Sport Orthop. Traumatol.* 2018; 34: 3–14
 37. Hoppe MW, Baumgart C, Polglaze T, Freiwald J: Validity and reliability of GPS and LPS for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One* 2018; 13: e0192708
 38. Hoppe MW, Baumgart C, Slomka M, Polglaze T, Freiwald J: Variability of metabolic power data in elite soccer players during pre-season matches. *J Hum Kinet* 2017; 58: 233–45
 39. Hoppe MW, Baumgart C, Sperlich B et al.: Comparison between three different endurance tests in professional soccer players. *J Strength Cond Res* 2013; 27: 31–7
 40. Hoppe MW, Freiwald J, Baumgart C, Born DP, Reed JL, Sperlich B: Relationship between core strength and key variables of performance in elite rink hockey players. *J Sports Med Phys Fitness* 2015; 55: 150–7
 41. Hoppe MW, Slomka M, Baumgart C, Weber H, Freiwald J: Match running performance and success across a season in German Bundesliga soccer teams. *Int J Sports Med* 2015; 36: 563–6
 42. Krstrup P, Bradley PS, Christensen JF et al.: The yo-yo IE2 test: physiological response for untrained men versus trained soccer players. *Med Sci Sports Exerc* 2015; 47: 100–8
 43. Krstrup P, Mohr M, Amstrup T et al.: The yo-yo intermittent recovery test: physiological response, reliability, and validity. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35: 697–705
 44. Leger LA, Lambert J: A maximal multi-stage 20-m shuttle run test to predict VO₂ max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1982; 49: 1–12
 45. Lemmink KA, Visscher C: The relationship between the interval shuttle run test and maximal oxygen uptake in soccer players. *J Hum Mov Stud* 2003; 45: 219–32
 46. Linke D, Link D, Lames M: Validation of electronic performance and tracking systems EPTS under field conditions. *PLoS One* 2018; 13: e0199519
 47. Maud PJ, Foster C: Physiological assessment of human fitness. 2. Aufl., Champaign: Human Kinetics, 2006
 48. Meyer T, Ohlendorf K, Kindermann W: Konditionelle Fähigkeiten deutscher Spitzenfußballer im Längsschnitt. *Dtsch Z Sportmed* 2000; 51: 271–7
 49. Ogris G, Leser R, Horsak B, Kornfeind P, Heller M, Baca A: Accuracy of the LPM tracking system considering dynamic position changes. *J Sports Sci* 2012; 30: 1503–11
 50. Osgnach C, di Prampero PE: Metabolic power in team sports – part 2: aerobic and anaerobic energy yields. *Int J Sports Med* 2018; 39: 588–95
 51. Rampinini E, Bishop D, Marcora SM, Ferrari Bravo D, Sassi R, Impellizzeri FM: Validity of simple field tests as indicators of match-related physical performance in top-level professional soccer players. *Int J Sports Med* 2007; 28: 228–35
 52. Reid LC, Cowman JR, Green BS, Coughlan GF: Return to play in elite rugby union: application of global positioning system technology in return-to-running programs. *J Sport Rehabil* 2013; 22: 122–9
 53. Rein R, Memmert D: Big data and tactical analysis in elite soccer: future challenges and opportunities for sports science. *Springerplus* 2016; 5: 1410
 54. Rossi A, Pappalardo L, Cintia P, Iaia FM, Fernandez J, Medina D: Effective injury forecasting in soccer with GPS training data and machine learning. *PLoS One* 2018; 13: e0201264
 55. Seidl T, Czyz T, Spandler D, Franke N, Lochmann M: Validation of football's velocity provided by a radio-based tracking system. *Procedia Engineering* 2016; 147: 584–9
 56. Sonderegger K, Tschopp M, Taube W: The challenge of evaluating the intensity of short actions in soccer: a new methodological approach using percentage acceleration. *PLoS One* 2016; 11: e0166534
 57. Spencer M, Bishop D, Dawson B, Goodman C: Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med* 2005; 35: 1025–44
 58. Tanner RK, Gore CJ: Physiological tests for elite athletes, ed. A.I.O. Sport. Champaign: Human Kinetics 2013
 59. Tonnessen E, Hem E, Leirstein S, Haugen T, Seiler S: Maximal aerobic power characteristics of male professional soccer players, 1989–2012. *Int J Sports Physiol Perform* 2013; 8: 323–9
 60. Vanrenterghem J, Nedergaard NJ, Robinson MA, Drust B: Training load monitoring in team sports: a novel framework separating physiological and biomechanical load-adaptation pathways. *Sports Med* 2017
 61. Williams JD, Abt G, Kilding AE: Ball-Sport Endurance and Sprint Test (BEAST90): validity and reliability of a 90-minute soccer performance test. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 3209–18
 62. Zedda S, Scotti PG, Cardani A, Aresini G, Sartorelli E: Comparison between work capacity evaluated by bicycle ergometer and by treadmill in cyclists, soccer players and normal non-athletic subjects. *Med Lav* 1970; 61: 452–68