

Eine biomechanische Analyse des Absprungs beim Weitsprung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von
Anne Christine Huber
aus Freiburg

Tübingen, August 2012

Tag der mündlichen Prüfung: 10.10.2012

Dekan:

Professor Dr. rer. soc. Josef Schmid

1. Gutachter:

Professor Dr. Veit Wank

2. Gutachter:

PD Dr. Stefan Grau

Vorwort

Die vorliegende Arbeit zur biomechanischen Analyse des Absprungs im Weitsprung beschäftigt sich mit der Thematik der sportlichen Technik im Leistungssport und setzt sich dabei insbesondere mit individuellen und Individuen-übergreifenden Bewegungsanalysen von Weitsprüngen aus unterschiedlichen Anlaufdistanzen auseinander.

Die sportliche Technik ist geprägt von persönlichen Technikstilen und den zielorientierten Lösungsmöglichkeiten für die sportlichen Bewegungsaufgabe, die in der Regel – entsprechend der konditionellen, sensomotorischen und konstitutionellen Voraussetzungen – das individuelle Optimum widerspiegelt. Die Orientierung und das Finden einer effektiven Lösungsstrategie für den Bewegungsablauf erfolgt meist auf der Grundlage von biomechanischen Analysen von Bestleistungen, Ergebnissen von theoretischen Berechnungen, Erkenntnissen zu Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Erfahrungen von Trainern. Die Entwicklung und Optimierung der funktionellen Zieltechnik (unter Berücksichtigung der jeweiligen Voraussetzungen und Dispositionen) ist dabei im Sinne des "Voraussetzungstrainings" (Martin, 1999) ein über mehrere Jahre angesteuerter Prozess, bei dem es darum geht, eine stabile und kontinuierliche Verbesserung der speziellen Leistungsfähigkeit zu schaffen.

Daran anknüpfend stellten sich hinsichtlich der Technik des Weitsprungs generell und der Entwicklung individueller Lösungsstrategien für diese Arbeit zwei Untersuchungsschwerpunkte heraus. Zum einen wurde mit der Analyse der Absprungbewegungen eine Identifikation und Klassifikation von Absprungstrategien von Weitsprüngen verschiedener Weitspringer gleichen Leistungsniveaus vorgenommen. Andererseits wurden Leistungsentwicklungen und Veränderungen in der Absprungbewegung über mehrere Makrozyklen beobachtet und beschrieben. Anhand eines Beispiels wurde dazu detailliert aufgezeigt, welche Einflussgrößen und relevanten Absprungsparameter die Leistungsentwicklung einer Nachwuchsathletin erklären und wie die technische Entwicklung tatsächlich quantifizierbar ist.

Die Datenerfassung für diese Arbeit ermöglichte sich durch die Kooperation des Arbeitsbereichs Bewegungswissenschaft, Biomechanik und Trainingswissenschaft des Instituts für Sportwissenschaft der Eberhard Karls Universität Tübingen und der Trainingsgruppe des Landestrainers der Disziplingruppe Sprung am Olympiastützpunkt in Stuttgart. Im Rahmen eines Betreuungsprojektes wurde über den Zeitraum von drei

Jahren eine komplexe biomechanische Leistungsdiagnostik für die Kaderathleten durchgeführt, wobei durch die zahlreichen und umfangreichen Messeinheiten eine außergewöhnlich große Datenbasis für wissenschaftliche Untersuchungen geschaffen werden konnte.

An dieser Stelle möchte ich mich deshalb ganz besonders bei Tamas Kiss, dem derzeitigen Landestrainer im Bereich Sprung am Olympiastützpunkt Stuttgart, für die gute und geschätzte Kooperation, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Planung und Durchführung über die vielen Messtermine hinweg bedanken. Ein ausdrücklicher Dank gilt den Athletinnen und Athleten, die an dem Projekt teilgenommen haben, bei den Messterminen immer motiviert waren und ihre besten Leistungen abgerufen haben. Sie haben nicht nur die Grundlage für diese Arbeit geschaffen, sondern auch mit ihrer Offenheit und ihrem Interesse an den Ergebnissen für eine sehr freundschaftliche Atmosphäre gesorgt.

Inhalt

Vorwort	I
Inhalt	III
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Studien zur Technik des Weitsprungs ..	5
2.1 Technik und Technikanalysen	6
2.1.1 Anlaufgestaltung	9
2.1.2 Absprungvorbereitung	13
2.1.3 Absprungphase und Absprungbewegung	16
2.1.4 Flugphase und Landung	23
2.2 Training und Diagnostik des Weitsprungs	25
2.2.1 Inhalte des Weitsprungtrainings	26
2.2.2 Konzeption und Ziele der Leistungsdiagnostik	27
2.3 Rezension zu bisherigen Studien und Ableitung der Forschungsfragen	29
3 Messverfahren und Analysemethoden	33
3.1 Untersuchungsgruppe, Organisation und Messablauf	33
3.2 Datenerfassung und Datenverarbeitung	35
3.2.1 Kinematographie	35
3.2.2 Dynamometrie	37
3.2.3 Geschwindigkeitsmessung	38
3.2.4 Datenverarbeitung	38
3.3 Parameterberechnung und Auswerteverfahren	42
3.3.1 Kinematik	42
3.3.2 Dynamik	46
3.3.3 Vergleich der 2D und 3D Kinematik	49
3.3.4 Statistische Prüfverfahren	51

4	Erkenntnisse, Phänomene und theoretische Überlegungen zur Absprungphase des Weitsprungs	53
4.1	Anlauf und Absprungvorbereitung	55
4.1.1	Anlaufgestaltung	55
4.1.2	Anfangsgeschwindigkeit beim Brettkontakt	58
4.2	Absprungbewegung	60
4.2.1	Stemmposition und Winkelverläufe des Sprungbeins in der Umlenkbewegung des Absprung	60
4.2.2	Gelenktrajektorien des Sprungbeins	65
4.2.3	Körperschwerpunktrajektorien	67
4.2.4	Rotationsumkehr in der Stützphase	69
4.2.5	Brems- und Beschleunigungsanteile in der Absprungphase . .	72
4.2.6	Abfluggeschwindigkeit und Winkel	76
4.2.7	Vertikaler und horizontaler Brems- und Beschleunigungskraftstoß	78
4.2.8	Verknüpfung kinematischer und dynamischer Zeitverläufe . .	85
4.3	Muster im individuellen Absprungverhalten	93
4.4	Abschätzung der theoretischen Sprungweite	100
4.5	Effektivität der Umlenkbewegung	105
4.5.1	Quotient zur Gütebestimmung	105
4.5.2	Individuelle Ausprägung der Absprunquotienten	106
4.6	Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf	108
4.6.1	Vergleich der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf und dem Wettkampfanlauf	109
4.6.2	Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf als Testbarometer . .	118
4.7	Klassifikation der Sprungtypen	126
4.7.1	Strategien in der Umlenkbewegung - Kinematik	126
4.7.2	Strategien in der Umlenkbewegung - Dynamik	130
4.7.3	Überblick über die definierten Absprungtypen	132
4.7.4	Diagnostik des Weitsprungabsprungbewegung und Einordnung der Ergebnisse	133
4.8	Leistungsentwicklung einer Nachwuchsathletin über drei Jahre	135
5	Diskussion	143
5.1	Methodendiskussion	143
5.2	Ergebnisdiskussion	149

6 Zusammenfassung	150
Literaturverzeichnis	154
Abkürzungen	161



Kapitel 1

Einleitung

Gleiche Weitsprungweiten können mit verschiedenen Sprungtechniken erreicht werden. Dies belegen nicht zuletzt der Weitsprung-Weltrekordhalter Mike Powell (8.95m) und Carl Lewis (mit 8.91m) im Endkampfduell der Weltmeisterschaft in Tokio 1991.

Dass Trainer und Athleten bei der Optimierung von Bewegungsabläufen wie denen des Absprungs ganz bewusst nach individuellen und funktionellen Technikvarianten suchen und diese anwenden, lässt sich an vielen Beispielen vergegenwärtigen. Das Thema der „individuellen sportlichen Technik“ wird immer dann aufgegriffen und diskutiert, wenn Athleten – entsprechend ihrer individuellen Voraussetzungen – persönliche Technikvarianten anwenden oder Technikstile prägen und damit international erfolgreich sind (vgl. Thiess et al. 1980; Weineck, 2007; Grosser & Neumaier, 1982). In welchem Spektrum optimale individuelle Lösungsmöglichkeiten erzielt werden können und wie effizient die jeweils unterschiedlichen, technischen Bewegungsausführungen sind, ist für die Weitsprungtechnik und insbesondere für die Absprungbewegung bislang nicht hinreichend erklärt.

Prinzipiell richtet sich die Optimierung der Technik des Weitsprungs auf zwei Faktoren aus. Zum einen soll die Abfluggeschwindigkeit maximiert, zum anderen die Richtung der Abfluggeschwindigkeiten optimiert werden. Der Spielraum der Parameterausprägung für die horizontale Geschwindigkeitsreduktion und den vertikalen Geschwindigkeitsgewinn für eine effiziente Technikausprägung ist hierbei klein, da bereits geringe Veränderungen in den einzelnen Bewegungsparametern große Auswirkungen haben können (vgl. Neumaier & Ritzdorf, 1983).

Das Erreichen einer maximalen Abfluggeschwindigkeit – als Hauptziel des Weitsprungsabsprungs – setzt die optimale Ausprägung aller auf die Beschleunigung orientierten Einflussgrößen voraus. Dazu müssen vor allem die Anfangsposition, die Stemmposition und Abflugposition sowie die horizontalen Brems- und die vertikalen Beschleunigungskraftstöße optimiert werden.

Einige Untersuchungen beschäftigen sich mit der Absprungbewegung des Weitsprungs von einzelnen Spitzenathleten bei Meisterschaften und analysieren leistungsrelevante Parameter der absprungvorbereitenden Phase und des Absprungs. Keine der Studien geht dabei jedoch auf typische Absprungmuster oder auf die Stabilität einzelner Bewegungsmerkmale ein.

Entwicklungsverläufe über mehrere Makrozyklen, über die Saison oder über mehrere Jahreszyklen, werden zwar in den Bundes-Leistungsdagnostiken erfasst und dokumentiert – das Archiv ist dabei sehr umfassend. Eine wissenschaftliche Begleitung oder Aufarbeitung der Daten liegt jedoch diesbezüglich nicht vor. Studien zur Leistungsentwicklung von Weitspringern sind nicht publiziert.

Wissenschaftliche Untersuchungen im Spitzensport sind generell nicht nur wegen der inhärenten Probleme wie der Verfügbarkeit der Athleten schwer durchführbar. Dazu kommt auch, dass sich gerade in der Wettkampfphase, wenn die technische Form ausgebildet ist, zeitlich kaum Möglichkeiten finden, die Sportler für Studien zu gewinnen. Untersuchungen zur Weitsprungtechnik von Spitzensportlern beschränken sich deshalb häufig auf Auswertungen von Wettkampfdiagnostiken, wobei sich die Datenerfassung aus logistischen und technischen Gründen auf die kinematische Analyse begrenzt und oft nur wenige Sprünge umfasst.

Eine systematische Untersuchung im Leistungssport kann deshalb nur auf der Basis einer Kooperation erfolgen, die sowohl für Athleten und Trainer als auch für die Wissenschaft einen Mehrwert darstellt. Mit der Motivation, Wissenschaft im Spitzensport zu integrieren, wurde für diese Arbeit für die Kaderathleten (D- bis A-Kader) der Disziplingruppe Sprung am Olympiastützpunkt in Stuttgart eine Plattform zur trainingsbegleitenden Leistungsdiagnostik erstellt. Im Rahmen eines Betreuungsprojekts des Instituts für Sportwissenschaft der Universität Tübingen mit dem Olympiastützpunkt Stuttgart wurde dort über den Zeitraum von drei Jahren eine komplexe Leistungsdiagnostik durchgeführt.

Der Nutzen dieser Kooperation für Trainer und Athleten war die Konzeption und Durchführung einer praxisnahen, umfangreichen und äußerst präzisen biomechanischen Analyse von Weitsprüngen aus unterschiedlichen Anlaufängen und Standardtests. Neben

den klassischen Leistungsparametern wie den Sprungweiten, den Anlauf- und Abfluggeschwindigkeiten und den Absprungparametern der Weitsprünge aus unterschiedlichen Anlaufängen, wurden klassische Leistungstests (Zubringerleistungen) erfasst.

Für die wissenschaftlichen Untersuchungen konnte eine höchst präzise und umfassende Datenbasis von Weitsprüngen, die auf technisch hohem Niveau basieren, gewonnen werden, anhand derer die Absprungbewegung detailliert analysiert werden konnte.

In welchem Parameterbereich Topsprünge realisiert werden können, und welche Kombinationen der relevanten Absprungparameter tatsächlich auch effektiv sind, steht im Fokus dieser Arbeit. Interessant ist dabei vor allem, inwieweit die individuellen Lösungsstrategien der Athleten – unter funktionellen Gesichtspunkten – Vorteile mit sich bringen und in welchem Ausmaß die individuellen Technikvarianten der Einzelnen noch effizient sind. Für Leistungsdiagnosen und -prognosen ist darüber hinaus entscheidend, ob diese individuellen Absprungmuster auch eine Stabilität aufweisen. Das heißt, ob die typischen Bewegungsmerkmale auch in den individuell besten Leistungsergebnissen wieder zu erkennen sind, oder ob sich letzten Endes gerade hier zeigt, dass gute Sprünge doch eher auf einen einzigen, konventionellen Lösungsweg zurückzuführen sind. Um die Differenzen aber auch die individuellen Besonderheiten zwischen den Absprungbewegungen einzelner Athleten zu quantifizieren, müssen zunächst einmal effiziente Absprungstrategien voneinander abgegrenzt und Definitionen sowie Klassifikationen unterschiedlicher Sprungtypen vorgenommen werden.

Auf dieser Grundlage können mit Längsschnittuntersuchungen die Leistungsfähigkeit und die technische Entwicklung anhand der leistungsbestimmenden Parameter über den Saisonverlauf, aber auch insbesondere über mehrere Jahreszyklen hinweg zielgerichtet beobachtet werden. Davon ausgehend, dass die Leistungsverbesserung auf der Entwicklung verschiedener Parameter beruht, stellt sich dann einerseits die Frage, welche Bewegungsmerkmale die Leistung hauptsächlich determinieren und andererseits, welche der relevanten und dominanten sowohl technischen als auch konstitutionellen Parameter sich über einen längeren Trainingsprozess leistungsbestimmend verändern.

Die Evaluation und kritische Auseinandersetzung mit den Methoden der Erhebung von leistungsbestimmenden Parametern und der Optimierung von komplexen Leistungsdiagnosen sind gerade dann von Bedeutung, wenn anhand von Testleistungen Rückschlüsse auf die Leistungsform der Athleten erfolgen. Dabei stellt insbesondere der Unterschied von Sprüngen aus dem mittleren und denen aus dem Wettkampfanlauf einen wesentlichen und relevanten Aspekt dar. Eine Ähnlichkeit der Sprünge aus den beiden

Anlaufdistanzen auf hohem Leistungsniveau hat dabei nicht nur Konsequenzen für weitere Untersuchungsvorhaben, sondern bietet zusätzliche Möglichkeiten für die Leistungsdiagnostik und den darauf abgestimmten Trainingsprozess.

Kapitel 2

Grundlagen und Studien zur Technik des Weitsprungs

Sprünge gibt es in nahezu allen Sportarten. Die Gestaltung des Sprunges und das Absprungverhalten unterscheiden sich je nach Ziel der Sprünge voneinander.

Bei den Spielsportarten dient ein Sprung beispielsweise dazu, einen Gegenspieler zu überspringen oder um nahe an das Tor zu gelangen, um eine erfolgreiche Toraktion zu erzielen. In den kompositorischen Sportarten muss mit dem Sprung eine vorgegebene Sprungtechnik bzw. Flugelemente möglichst exakt erfüllt werden. Beim Weitsprungsabsprung geht es hingegen darum, die Absprungparameter so zu optimieren, dass mit dem Absprung eine möglichst große Sprungweite erreicht wird. Die Frage nach der Absprunggestaltung und der Vorbereitung des Sprungs, um optimale Voraussetzungen für den Sprung zu schaffen, ist also abhängig von der Zielstellung des Sprungs.

Die zentrale Phase des Weitsprungs ist die Absprungphase. In der Stützphase wird die erreichte Anlaufgeschwindigkeit in gewünschte Abflugparameter umgewandelt und somit die Sprungweite im wesentlichen bestimmt. Leistungsdiagnostische Analysen von Weitspringern (siehe Abb. 2.1) sowie wissenschaftliche biomechanisch-diagnostische Untersuchungen und Forschungsarbeiten im Bereich der Modellierung und Modellverifikation (Rídká-Drdácká, 1986; Seyfarth et al., 1999; Seyfarth et al., 2000) konzentrieren sich daher meist auf diese Phase des Weitsprungs.

2.1 Technik und Technikanalysen

Der Weitsprung lässt sich in vier Phasen untergliedern: den Anlauf, den Absprung, die Flugphase und die Landung (Ballreich & Brüggemann, 1986; Bauersfeld & Schröter, 1986; Hay et al., 1986; Dickwach, 1991). Innerhalb dieser Sprungabschnitte unterscheiden Ballreich & Brüggemann (1986) für den Weitsprung noch weitere Phasen. Der Anlauf setzt sich aus der Beschleunigungsphase und der Absprungvorbereitung zusammen. Den Absprung unterteilen die Autoren (ebd.) in die Absprungbeugung und die Absprungstreckung und beschreiben damit das passive Beugen des Sprungbeines in der Stützphase und die anschließende Abdruckstreckung nach vorn oben. Die Flugphase setzt sich aus einer symmetrischen Flugbahnphase und der Landeanflugphase zusammen, die Landung aus Landepositionierung und Landedurchführung.

Welche biomechanischen Merkmale und Kriterien für einen optimalen Weitsprung von Bedeutung sind und leistungsdiagnostisch bisher im Blickfeld der Untersuchungen waren, wird in diesem Kapitel dargestellt. Da in der Arbeit der Fokus auf der Anlaufgestaltung, der Absprungvorbereitung und dem Absprungverhalten liegt, wird auf eine umfangreiche Ausführung der Flug- und Landephase verzichtet. Nach der Darstellung bisheriger Forschungsergebnisse, wird in einer Rezension der Forschungsstand kritisch reflektiert.

Die Biomechanik des Weitsprungs wurde bisher mit kinematischen, dynamischen und elektromyographischen Messmethoden untersucht. Die meisten Studien analysieren das Absprungverhalten von Spezialisten und vergleichen unterschiedliche Leistungsklassen bezüglich leistungsrelevanter Kriterien. Eine Vielzahl der Untersuchungen sind aus den 80er und 90er Jahren und basieren auf Videoanalysen. Neuere Veröffentlichungen beschäftigen sich beispielsweise mit strukturellen Veränderungen der Bewegungsmuster durch den Einsatz passiver Bewegungshilfen im Training in der absprungvorbereitenden Phase und im Absprung (Jaitner et al., 2001) und neueren Methoden des Techniktrainings (Jaitner, 2001). Tab. 2.1 bietet einen Überblick ausgewählter Untersuchungen, auf die im Folgenden Bezug genommen wird. Neben der Untersuchungsgruppe mit dem jeweiligen Leistungsbereich der Athleten sind die Anzahl der ausgewerteten Weitsprünge und die Messmethoden aufgeführt.

Tab. 2.1: Überblick biomechanischer Untersuchungen zur Vorbereitungs- und Absprunghase des Weitsprungs.

Autoren	Untersuchte	Leistungsbereich	n	Untersuchungs- methodik
Ballreich, 1973		5.00m - 7.22m	60	2D-Videoanalyse (200Hz), Dynamometrie
Nigg, Neukomm & Waser, 1973	Ländervergleichs- wettkampf: D-CH: 6 Spezialisten	7.18m - 7.98m	21	2D-Videoanalyse (200Hz) akustische Kontaktzeitmessung
Bosco, Luthanen & Komi, 1976	4 Spezialisten, 4 regionale Springer	6.12m - 7.39m	8	2D-Videoanalyse (100Hz), Dynamometrie
Luthanen & Komi, 1979	4 nationale, 6 regionale Weitspringer	6.95m \pm 0.15m, 5.92m \pm 0.22m	8, 6	2D-Videoanalyse (100Hz), Dynamometrie
Kollath, 1982	27 Studenten	5.50m - 7.12m	27	2D-Videoanalyse (110 Hz), Dynamometrie: 2 Kraftmessplatten, Somatometrie
Brüggemann, Nixdorf & Ernst, 1982	Spezialisten, Zehnkämpfer, Nachwuchsathleten, Studenten	6.50m - 8.00m k.A. bei Studenten	26	2D-Videoanalyse, Dynamometrie, Elektromyographie, Somatometrie
Nixdorf & Brüggemann, 1983	Spezialisten, Nachwuchsspringer, Zehnkämpfer, Siebenkämpfer	7.68m \pm 0.11m 7.31m \pm 0.15m 7.15m \pm 0.38m 6.05m \pm 0.20m	23	2D-Videoanalyse: 3 Kameras, (200Hz)
Nixdorf & Brüggemann, 1985	weibl. und männl. Mehrkämpfer, Spezialisten	6.54m - 6.95m 5.45m - 5.82m 7.50m - 7.80m	20, 27	2D-Videoanalyse, Dynamometrie
Hay & Miller, 1985	Finale OS 1984, 12 Frauen	5.88m - 6.96m	12	2D-Videoanalyse (120Hz)
Hay, Miller & Canterna, 1986	12 Spezialisten	7.39m - 8.79m	12	2D-Videoanalyse: 2 Kameras, (100Hz)
Kyröläinen et al, 1988	6 weibl. und männl. Spezialisten	6.61m \pm 0.38m, 5.61m	k.A.	2D-Videoanalyse, Dynamometrie, Elektromyographie
Scheirman, Smith & Dillman, 1988	6 Zehnkämpfer	6.70m - 7.21m	19	2D-Videoanalyse (100Hz) Dynamographie
Hay, 1988	US-Wettkämpfe: 14 weibl. und 14 männl. Weltklasse- Spezialisten, 12 weibl. und 7 männl. Weltklasse- Spezialisten	k. A.	61 48, 51, 24	2D-Videoanalyse: 1 Kamera (100 Hz); 2D-Videoanalyse: 2 Kameras (100 Hz)

Tab. 2.1: Überblick biomechanischer Untersuchungen zur Vorbereitungs- und Absprunghase des Weitsprungs.

Hay & Koh, 1988	US Championship: weibl. und männl. Weitspringer und Dreispringer	5.74m - 6.13m 6.94m - 7.94m	225	2D-Videoanalyse (32 Hz), 2D-Filmanalyse (50-70Hz)
Marino & Young, 1988	12 männl. Athleten	k. A. (Horizontal- sprünge)	12	2D-Videoanalyse (100Hz); Dynamometrie
Smith, Scheirman & Dillmann, 1988	7 Siebenkämpfer, 6 Spezialisten	6.70m - 7.21m; 7.98m	20, 19	2D-Videoanalyse (100Hz); 2D-Filmanalyse
Hay & Nohara, 1990	5 Wettkämpfe: 26 weibl. und 20 männl. Spezialisten	5.92m - 6.91m 7.25m - 8.79m	26, 20	2D-Videoanalyse: 2 Kameras (100Hz)
Koh & Hay, 1990	US Championship: 19 männl. Spezialisten	7.39m - 8.82m	19	2D-Videoanalyse: 2 Kameras (100Hz)
Nixdorf & Brüggemann, 1990	Endkampf OS 1988, Frauen und Männer	6.47m - 7.40m 7.87m - 8.72m	16	2D-Videoanalyse
Witters, Bohets & Van Coppenolle, 1991	Endkampf, WM 1987: 8 weibl. und 8 männl. Spezialisten	6.41m - 7.14m 8.05m - 8.67m	12, 8	2D-Videoanalyse (200Hz)
Lees, Fowler & Derby, 1992	World Student Games: 6 Spezialistinnen	5.54m - 6.87m	22	2D-Videoanalyse (100Hz)
Fukashiro & Wakayama, 1992	WM 1991, Lewis und Powell	8.95m, 8.91m	2	2D-Videoanalyse, 2D-Filmanalyse
Lees, Graham-Smith & Fowler, 1994	Finale der World Student Games 1991, 10 Spezialisten	7.13m - 8.18m	27	2D-Videoanalyse (100Hz)
Berg & Greer, 1995	19 männl. Studenten	4.27m - 6.22m	71	2D-Videoanalyse: 2 Kameras (135Hz)
Ramlow, Romanautzky, 1996	Einzelfallanalyse	k. A.	1	2D-Videoanalyse
Hay, 1995	versch. Wettkämpfe: Spezialisten	k. A.	56	2D-Videoanalyse
Jaitner & Schöllhorn, 1997	10 Zehnkämpfer	6.88m - 7.76m	15	2D-Videoanalysen (100-110Hz)
Scott, Li & Davids, 1997	11 männl. Studenten (keine Weitspringer)	3.95m - 5.41m	47	2D-Filmanalysen (25 Hz)
Coh, Kugovnik & Dolenc, 1997	versch. Wettkämpfe: 24 Spezialisten	5.82m - 8.00m	24	3D-Videoanalyse mit 2 Kameras, 3 Lichtschranken
Müller & Brüggemann, 1998	Endkampf WM 1997, weibl. und männl. Spezialisten	6.64m - 7.05m 7.88m - 8.42m	16	2D-Videoanalyse: 3 Kameras (50Hz), 1 Kamera (250Hz), Lasermessung

Tab. 2.1: Überblick biomechanischer Untersuchungen zur Vorbereitungs- und Absprungsphase des Weitsprungs.

Stefanyshyn & Nigg, 1998	4 männl. Studenten	k. A.	24	2D-Videoanalyse: 4 Kameras (200Hz), Kraftmessplatte (1kHz) 85 Drucksensoren in Schuhsohle (100Hz)
Kakahana & Suzuki, 2001	2 männl. Athleten	Weitsprünge aus kurzem Anlauf: 2.55m - 4.22m	6	2D-Videoanalyse (250Hz), EMG, (1kHz), Kraftmessplatte (1kHz)
Jaitner, Mendoza & Schöllhorn, 2001	weibl. und männl. Nachwuchsathleten, Studenten	4.45m - 6.84m	57	2D-Videoanalyse (150Hz)
Miladinov, 2006	11 weibl. und 10 männl. Springer (gemischtes Leistungsniveau)	4.47m - 6.98m	62	2D-Videoanalyse (50Hz) 2 Kraftmessplatten (200Hz) 3 Lichtschranken (2m Abstand)

2.1.1 Anlaufgestaltung

Mit dem Anlauf sollen drei Voraussetzungen geschaffen werden. Zuerst soll eine möglichst hohe Anlaufgeschwindigkeit entwickelt werden, die im Absprung anschließend umgesetzt werden muss. In der Absprungvorbereitung auf den letzten drei Schritten soll der Springer eine Absprungposition erreichen, aus der das Umlenken der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit in zunehmend vertikale Geschwindigkeitsanteile erfolgen kann. Dies gelingt durch das Absenken des Körperschwerpunktes infolge einer Schrittveränderung auf den letzten Schritten vor dem Absprung. Letztlich muss dabei der Absprungbalken ohne Verluste, das heißt mit möglichst wenig verschenkter Distanz, getroffen werden (vgl. Hay, 1993).

In der Leistungsdiagnostik werden standardisiert die Zeiten auf den beiden 5m-Intervallen vor dem Absprung mit Hilfe von Lichtschranken gemessen. Die Abschnitte liegen bei 11m bis 6m und 6m bis 1m vor dem Absprungbalken. Über diese beiden 5m-Abschnitte lassen sich dann gemittelte Geschwindigkeiten bestimmen. Weitspringer der internationalen Leistungsklasse erreichen im Bereich von 11m und 6m vor dem Absprung Anlaufgeschwindigkeiten zwischen 10m/s und 11m/s (Hay & Nohara, 1990; Nixdorf &

Brüggemann, 1990; Coh et al., 1997). In der entsprechenden Leistungsklasse erreichen die Frauen zwischen 11m und 6m Geschwindigkeiten von 9m/s bis 10.5m/s (vgl. ebd.). Für die Sprünge der besten Weitspringer sind zum Vergleich in Tab. 2.2 die jeweils erreichten Anlaufs- und Abfluggeschwindigkeiten dokumentiert.

Tab. 2.2: Sprungweite W , Windverhältnisse, horizontalen Anlaufgeschwindigkeit v_{Anlauf} und die Abfluggeschwindigkeit v_{Abflug} der weltbesten Sprünge der Männer (vgl. Hay, 1993)

Athleten (alle U.S.A.)	W [m]	Wind [m]	v_{Anlauf} [m/s]	v_{Abflug} [m/s]
Mike Powell (1991)	8.95	0.3	10.94	9.8
Carl Lewis (1991)	8.91	2.9	11.06	10.2
Bob Beamen (1968)	8.90	2.0	10.99	9.6
Carl Lewis (1984)	8.79	–	11.1	10.0

Aktuellere Werte aus der Wettkampfdiagnostik, beispielsweise von den Halleneuropameisterschaften in Turin 2009, dokumentieren für den Siegesprung mit der Weite von 8.71m von Sebastian Bayer eine Anlaufgeschwindigkeiten von über 10.5m/s (Killing et al., 2010). Für Christian Reifs Sprung bei der Europameisterschaft in Barcelona 2010 mit der Weite von 8.47m wurde eine Anlaufgeschwindigkeit von 10.9m/s festgestellt (Killing & Knapp, 2010). Beide Beispiele zeigen, dass sich aktuelle Sprungleistungen, bezüglich der Sprungweiten und der Anlaufgeschwindigkeiten und Anfangsbedingungen, mit den oben angeführten Studien vergleichen lassen.

Für den Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Anlaufgeschwindigkeit konnte Hay (1995) in seiner Untersuchung an 56 Weitspringerinnen und Weitspringer auf nationalem amerikanischem und internationalem Niveau feststellen, dass mehr als die Hälfte der Springer die maximale Horizontalgeschwindigkeit im Moment des Lösens des Fußes zum vorletzten Anlaufschrittes erreichten. Bei den verbleibenden Sprüngen wurde bei mehr als der Hälfte der Sprünge die Höchstgeschwindigkeit im Anlauf zu Beginn des drittletzten Schrittes gemessen (siehe zur Veranschaulichung Abb. 2.1). Nach Hay et al. (1986) versuchen Weitspringer der Spitzenklasse durch ein sprintgemäßes Anlaufverhalten bis zum Lösen des Fußes vom vorletzten Schritt zu beschleunigen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Scheirmann et al. (1988), Koh & Hay (1990) und Nixdorf & Brüggemann (1990), die erst auf den zwei letzten Schritten oder sogar erst im letzten Schritt eine Geschwindigkeitsreduktion beobachteten.

Die Anlaufgeschwindigkeit stellt den größten Einflussfaktor für die gemessene Sprungweite dar. Hay (1995) berechnete in einer Untersuchung mit 39 Weitspringern und 28 Weitspringerinnen ($n = 306$ Sprünge), zwischen Anlaufgeschwindigkeit und der

offiziellen Sprungweite einen Zusammenhang von $r = 0.95$. Studien anderer Autoren belegen ebenfalls hohe Korrelationen. Die Koeffizienten sind Tab. 2.3 zu entnehmen.

Tab. 2.3: Zusammenhang zwischen der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit v_{Anlauf} und der Sprungweite W in verschiedenen Publikationen (Signifikanzniveau $p < 0.05$).

¹ keine Angaben zum Zeitpunkt der Anlaufgeschwindigkeitsmessung bzw. zum Signifikanzniveau

² Korrelation zwischen der effektiven Sprungweite (gemessen vom Stützpunkt im Moment des Abflugs) und der mittleren Geschwindigkeit des KSPs in den letzten Schritten

³ Korrelation zwischen der mittleren horizontalen Geschwindigkeit des KSP im Wegintervall 6m - 1m und der offiziellen Sprungweite (gemessen von der Balkenkante)

⁴ Korrelation zwischen der horizontalen Geschwindigkeit des KSP zu Beginn des Absprungs (erster Bodenkontakt) und der offiziellen Sprungweite

Autoren	Untersuchte	Leistungsbereich	n	Korrelation v_{Anlauf} und W
Nigg, Neukomm & Waser, 1973	6 Spezialisten	7.34m - 7.98m	21	0.83 ¹
Brüggemann, Nixdorf & Ernst, 1982	Spezialisten, Zehnkämpfer und Nachwuchsathleten	6.50m - 8.00m k.A. bei Studenten	26	0.57 ²
Kollath, 1982	Metaanalyse von 7 Literaturquellen	5.50m - 7.12m	108	0.84 ¹
Hay & Nohara, 1990	20 männl. und 26 weibl. Spezialisten	7.25m - 8.79m 5.92m - 6.91m	46	0.83* ⁴
Brüggemann & Nixdorf, 1990	Finale OS 1988 Männer und Frauen	7.87m - 8.72m 6.47m - 7.40m	16	0.65 bzw. 0.83 ³
Hay, 1995	39 Spezialisten und 28 Spezialistinnen	k.A.	306	0.95 ¹
Coh, Kugovnik & Dolenc, 1997	24 Wettkampfsprünge (Spezialisten)	5.82m - 8.00m	24	0.88* ³

Wie den verschiedenen Untersuchungen zu entnehmen ist, sind die Zusammenhänge von Anlaufgeschwindigkeit und Weitsprungweite auch vom Leistungsniveau abhängig. Nachwuchsathleten, aber auch Mehrkämpfer zeigen geringere Korrelationen bezüglich der Parameter als Spezialisten.

Mit einer vergleichenden Studie von kinematischen Anlauf- und Absprungsparametern konnte Ballreich (1993) nachweisen, dass bei Weitspringern höherer Leistungsklassen (mit Sprungleistungen von 6.49m bis 7.22m) die Anlaufgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Sprungleistung hat, während bei niedrigerem Leistungsniveau (mit Sprungweiten von 5.00m bis 5.95m) der Absprung über den Anlauf dominiert“. Berg & Greer (1995) folgern aus ihrer Studie, in der sie die Anlaufgestaltung von Nachwuchsathleten und erfahreneren Weitspringern anhand kinematischer Parameter vergleichen, dass Nachwuchsathleten vermutlich mehr damit beschäftigt sind, eine

günstige Absprungposition zu entwickeln und den Absprungbalken zu treffen und das Erreichen einer maximalen Anlaufgeschwindigkeit entsprechend nicht primär forcieren.

Analysen der Beschleunigungs- und Absprungvorbereitungsphase in Bezug auf das Treffen des Absprungbalkens bzw. das präzise Setzen des Sprungbeines von Lee et al. (1982) zeigen, dass Spezialisten dazu tendieren, den Anlauf auf den letzten fünf Schritten zu regulieren. Hay (1988) und Hay & Koh (1988) bestätigen dieses Verhalten in ihren Studien mit 19 Weitspringerinnen und Weitspringern internationalen Niveaus und 34 Weitspringerinnen und Weitspringern sowie 20 Dreispringerinnen und Dreispringern auf nationalem amerikanischem und internationalem Niveau.

In Untersuchungen mit weiblichen und männlichen Weitspringern und Dreispringern analysieren dazu Lee et al. (1982), Hay (1988) und Hay & Koh (1988) den Abstand jedes einzelnen Fußaufsatzpunktes der Anlaufschritte zum Absprungbrett (toe-board distance). Die räumliche Streuung bzw. Standardabweichung dieser Abstände, über alle Anlaufversuche eines Athleten, weist in den meisten Fällen bis zum fünftletzten Schritt einen ansteigenden Wert auf. Das bedeutet, dass die Anlaufgestaltung bis zu diesem Punkt nicht auf das Treffen des Absprungbalkens fokussiert ist. Die maximale Standardabweichung liegt bei männlichen und weiblichen Weitspringern nach Hay & Koh (1988) im Mittel bei $\pm 25\text{cm}$. Im Beschleunigungsabschnitt liegt nach den Autoren folglich die Priorität ausschließlich auf dem schnellen Geschwindigkeitsgewinn. Hierbei zeigt sich das interindividuelle stereotype Schrittmuster. Auf den letzten fünf Schritten wird die Standardabweichung der Fußaufsatzpunkte zum Brett wieder geringer. Dieses Verhalten erklären die Autoren mit der einsetzenden visuellen Kontrollstrategie – der „zeroing-in phase“ (perfektes Setzen des Sprungbeines auf den Absprungbalken) – der Springer ab diesem Zeitpunkt (Hay & Koh, 1988). Hay (1988) präzisiert die Aussagen, dass 67% der gesamt durchgeführten Anlaufkorrektur in den letzten beiden Schritten stattfinden. Nach Hay (1995) ist der Beschleunigungsabschnitt geprägt von einer „Programmierungsstrategie“, die auf Trainingserfahrungen beruht.

Hay & Koh (1988) fassen die Anforderungen an einen gelungenen Anlauf in drei Punkten zusammen. Erstens muss die Startposition des Anlaufs entsprechend den äußeren Gegebenheiten, den Witterungsbedingungen und den physischen Bedingungen angepasst werden. Zweitens muss der „programmierte“ Teil des Anlaufs, die Beschleunigungsphase, mit einem möglichst kleinen akkumulierten Fehler im Anlaufschrittmuster gestaltet werden. Drittens muss die visuelle Kontrolle eingesetzt werden, um die Länge der letzten Schritte so anzupassen, dass jeder „Fehler“, der im Beschleunigungsteil

akkumuliert wurde, nun eliminiert werden kann. Diese Anpassung sollte ohne Geschwindigkeitsverlust erfolgen.

2.1.2 Absprungvorbereitung

Untersuchte Einflußgrößen der absprungvorbereitenden Phase sind neben den Körperschwerpunktshöhen, die Schrittlängengestaltung der letzten drei Schritte, die die Absenkung des Körperschwerpunktes bedingt, die Stemm-, Absprung- und Flugpositionsweite, sowie die Reduktion der Horizontalgeschwindigkeit (vgl. Ballreich & Brüggemann, 1986). Abb. 2.1 zeigt exemplarisch die Schrittlängengestaltung und den Körperschwerpunktsverlauf während der letzten drei Schritte eines Weitsprungs aus dem Wettkampfanlauf mit einer Weite von 7.25m.

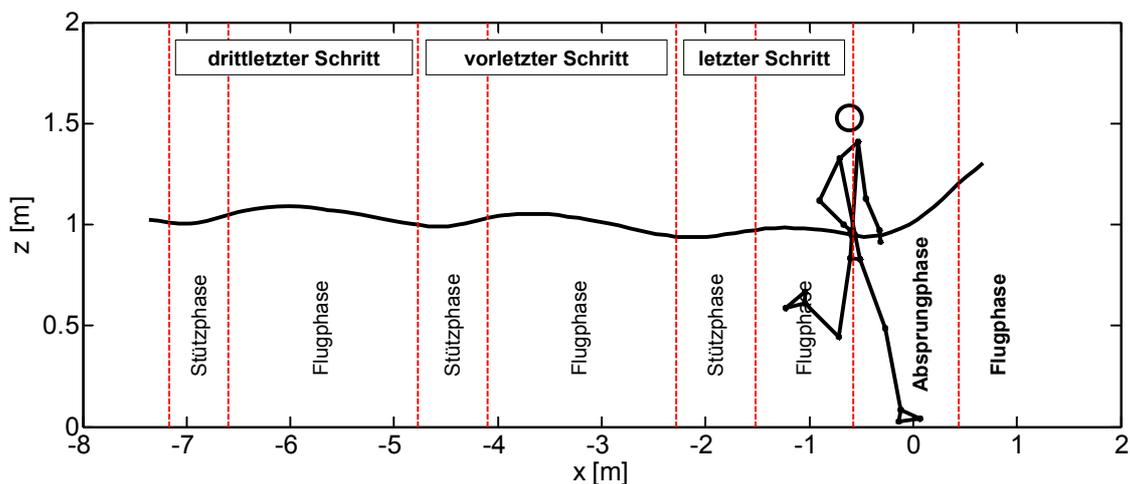


Abb. 2.1: Schrittlängengestaltung und KSP-Verlauf in der absprungvorbereitenden Phase. Die Abbildung ist zur besseren Veranschaulichung der KSP-Trajektorien in x-Richtung leicht gestaucht.

Die absprungvorbereitende Phase beginnt mit dem Fußaufsatz zum drittletzten Schritt (Ballreich & Brüggemann, 1986). Auf den folgenden Schritten wird der Körperschwerpunkt abgesenkt (Nixdorf & Brüggemann, 1983; Ballreich & Brüggemann, 1986; Dickwach, 1991), um das Umlenken der horizontalen Geschwindigkeit in vertikale Richtung zu begünstigen.

Für den Verlauf der Körperschwerpunktbahn bei den letzten vier Schritten zeigen sich in den Studien von Hay & Nohara (1990) zunächst nahezu identische mittlere Körperschwerpunktshöhen während der Stützphasen des viertletzten, drittletzten und vorletzten Schrittes. Das gleiche trifft für die Stemmpositionsweite (touchdown distance), die

Absprungspositionsweite (takeoff distance) und die Flugpositionsweite (flight distance) zu (siehe Abb. 2.2). Daraus schließen die Autoren, dass Spitzenweitspringer ihre übliche Schrittgestaltung zumindest bis zum Lösen zum vorletzten Schritt beibehalten.

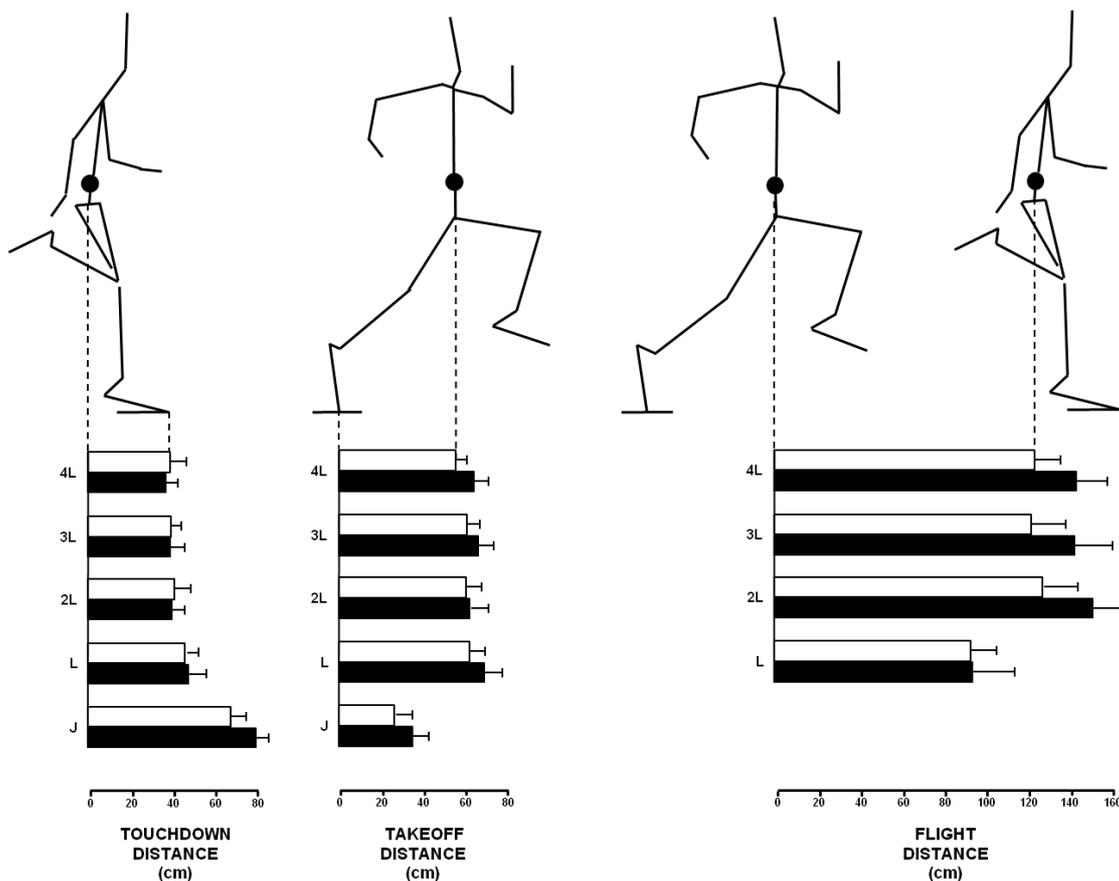


Abb. 2.2: Stemmpositionsweite (touchdown distance): horizontale Distanz zwischen KSP und Fußspitze beim ersten Bodenkontakt (im vorderen Stütz); Absprungspositionsweite (takeoff distance): horizontale Distanz zwischen KSP und Fußspitze beim hinteren Bodenkontakt (hinterer Stütz) und Flugpositionsweite (flight distance): horizontale Distanz der KSP-Flugphase für die letzten vier Schritte vor dem Absprung (Abstand zwischen takeoff und touchdown distance) für Frauen (weißer Balken) und Männer (schwarzer Balken) (modifiziert nach Hay & Nohora, 1990).

Nach Hay (1995) nimmt beim Aufsatz zum letzten Schritt die Höhe des Körperschwerpunkts deutlich ab, während die Stemmpositionsweite deutlich zunimmt. Das bedeutet, dass die Springer tiefer liegen und mit dem Stützfuß weiter vor dem Körper aufsetzen als bei den vorausgehenden Schritten. Während des letzten Schrittes ist die Flugpositionsweite deutlich verringert und die Stemmpositionsweite noch länger.

Nixdorf & Brüggemann (1983) stellen fest, dass der größte Teil der Schwerpunktabenkung im vorletzten Schritt erfolgt und beobachten eine geringfügige Fortsetzung der

Absenkung im letzten Schritt. In ihren Studien mit Spezialisten weisen sie im Mittel in der Flugphase des zweitletzten Schrittes ein Absenken von 8% gegenüber dem Anlaufniveau nach. Bis zum Absprungstütz werden im Mittel 10% Reduktion der Anlaufhöhe erreicht. Im Vergleich der Spezialisten mit Nachwuchsspringern und Mehrkämpfern ist die Absenkung des Körperschwerpunkts in der Absprungvorbereitung bei den Mehrkämpfern und Nachwuchsspringern mit 7% und bei den Mehrkämpferinnen und Nachwuchsspringerinnen mit 5% etwas geringer. Die Autoren sind der Meinung, dass das Ausmaß der Schwerpunktabenkung offensichtlich ein Indikator für die Technik darstellt.

Bezüglich der geschlechterspezifischen Unterschiede in der Absenkbewegung stellen Hay & Nohora (1990) fest, dass männliche Spitzenspringer im Vergleich zu weiblichen Spitzenspringerinnen früher und in Relation etwas tiefer absenken. Die Spitzenspringerinnen zeigen dann aber im Absprungstütz eine größere Absenkung, die mit einer größeren Beugung im Knie und Hüftgelenk erklärt werden kann. Die Autoren begründen dies damit, dass die Spitzenspringer im Absprungbein stärker sind und eine größere Beugung von Hüft-, Knie- und Knöchelgelenk tolerieren und nutzen können. Koh & Hay (1990), Nixdorf & Büggemann (1990), Müller & Brüggemann (1998) stützen diese Ergebnisse. Außerdem lässt sich nach Koh & Hay (1990) ein statistisch signifikanter Zusammenhang (mit $r=0.71$) zwischen der Körperschwerpunktabenkung im vorletzten Anlaufschritt und der effektiven Sprungweite feststellen.

Die Absenkung des Körperschwerpunkts wird durch die Verlängerung des vorletzten Schrittes und durch das passive Aufsetzen des Stützbeines im letzten Bodenkontakt vor dem Absprung begünstigt (Koh & Hay, 1990). Ramlow & Romanautzky (1997) weisen darauf hin, dass neben der Schrittlängenveränderung auch die Absenkung der Teilkörpermassen, einen entscheidenden Einfluss auf die erforderliche Körperschwerpunktabenkung und den Körperschwerpunktverlauf hat. Dies wird durch einen geringen Kniewinkel des Stützbeines im Stütz zum letzten Schritt begünstigt. Diese Phase der Absprungvorbereitung, die Tidow (1991) als „Schwungbeinhocke“ bezeichnet, ist wiederum durch einen großen Beugewinkel im Schwungbein während der letzten Stützphase gekennzeichnet. Das Übertragen der tiefen Körperschwerpunktposition in den letzten Schritt verlängert dann folglich den vertikalen Beschleunigungsweg (Müller & Brüggemann, 1998).

Individuelle Besonderheiten von Spitzenathleten verdeutlichen die Schwierigkeiten, Aussagen zur Schrittlängengestaltung zu festigen und allgemeingültige Trends zu finden. Während beispielsweise Bob Beamon, der in seinen 8.90m Sprung mit einem extrem

langen letzten Schritt absprang, dem „Leitbild“ widerspricht, zeichneten sich die Sprünge von Carl Lewis, durch einen sehr kurzen letzten Schritt aus. Normgrößen und Vergleichswerte für horizontale und vertikale Anfangsgeschwindigkeiten beim Brettkontakt liegen in der Literatur nicht vor.

2.1.3 Absprungphase und Absprungbewegung

Die Absprungphase oder Stützphase hat die Funktion, durch die Wirkung der Stützkräfte, die horizontale Anfangsgeschwindigkeit in eine möglichst hohe Abfluggeschwindigkeit bei einem optimalen Abflugwinkel umzulenken. Während des Stützes sollte die Reduktion der Horizontalgeschwindigkeit dabei möglichst gering gehalten werden. Die Vertikalgeschwindigkeit, die durch die aktive Streckbewegung des Sprungbeines erzeugt werden kann, sollte hingegen maximiert werden. Je mehr Geschwindigkeit dabei in die vertikale Abflugrichtung umgelenkt wird, desto größer wird entsprechend der Abflugwinkel.

Beim Weitsprung lassen sich zu Beginn des Brettkontaktes eine hohe Horizontalgeschwindigkeit und eine relativ geringe negative Vertikalgeschwindigkeit des Körperschwerpunkts messen. Das negative Vorzeichen der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit ergibt sich dabei durch die Bewegungsrichtung des Absenkens nach unten. Die Einstiegsbedingungen sind somit durch die hohe horizontale Anlaufgeschwindigkeit dominiert. Das frühzeitige vertikale Absenken des Körperschwerpunkts auf den letzten drei Schritten begründet die verhältnismäßig kleine Vertikalgeschwindigkeit.

Die horizontalen Bodenreaktionskräfte sind in der Stützphase des Absprungs zu großen Anteilen negativ. Das heißt, dass der Springer durch die Absprungphase seine horizontale Anlaufgeschwindigkeit reduziert. Der vertikale Geschwindigkeitsgewinn ist verhältnismäßig klein, so dass sich über den gesamten Stützverlauf infolge von überwiegenden Bremskräften ein Geschwindigkeitsverlust ergibt. Die vertikalen Bodenreaktionskräfte sind hauptsächlich durch die beim Aufprall auftretenden Bremskraftstöße, das dadurch erfolgende Beugen des Sprungbeins, sowie durch die Absprungstreckung geprägt, die dann nach dem Absenken des Körperschwerpunktes bis zum Umkehrpunkt nach vorn-oben erfolgt. Zu einer kleinen aber negativen Vertikalgeschwindigkeit zum Stützbeginn kommt also eine positive vertikale Geschwindigkeitsänderung hinzu. Dies ist in Abb. 2.3 veranschaulicht.

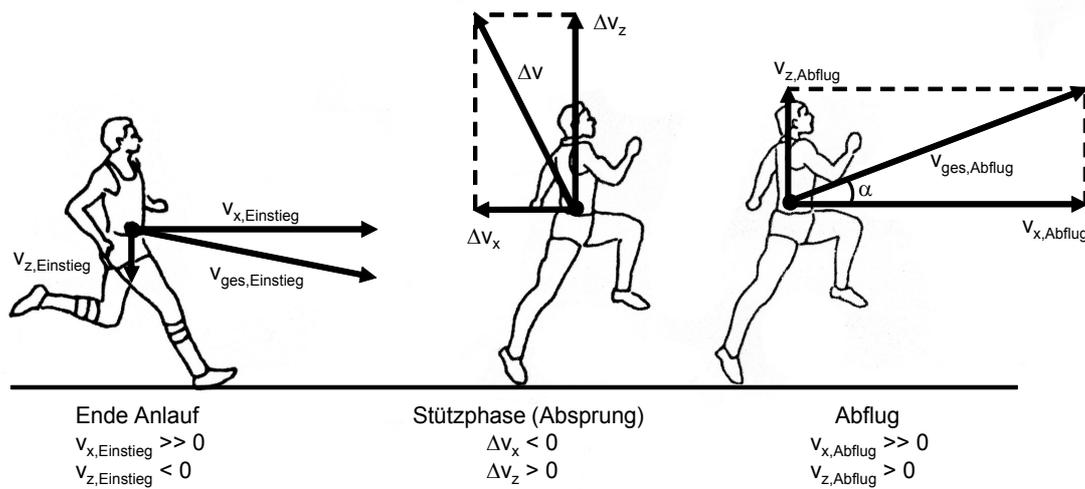


Abb. 2.3: Darstellung der resultierenden Geschwindigkeiten vor und nach der Stützphase mit der aus dem Stütz resultierenden Änderung der KSP-Geschwindigkeit beim Weitsprung (modifiziert nach Ballreich & Kuhlow, 1986).

Werden die horizontalen Brems- und Beschleunigungsanteile zeitlich über die vertikalen gelegt, ist bezüglich des Übergangs von Bremsen zu Beschleunigen ein Zeitversatz vorhanden. Die „Bewegungsumkehr“ des Körperschwerpunktes in vertikale Richtung ist zeitlich vor der „Beschleunigungsumkehr“ in horizontale Richtung. In Abb. 2.4 sind die Beschleunigungs- und Bewegungsumkehr durch die ausgefüllten Farbflächen gekennzeichnet.

Typische Kraft-Zeit-Verläufe der horizontalen Bodenreaktionskräfte zeigen einen großen negativen Bremskraftstoß, dessen Krafrichtung sich erst im letzten Teil des Absprungs umkehrt (Beschleunigungsumkehr). Je geringer der Bremskraftstoß, desto besser kann die Qualität des Sprungs eingeschätzt werden. Im vertikalen Bremskraftstoß ist das starke „Abbremsen“ des Körpers gleichermaßen sichtbar. Die hohen Anlaufgeschwindigkeiten beeinflussen dabei das durch die Trägheit verursachte Nachschwabben der Weichteile. Dieser Effekt der Schwabbelmassen verstärkt das erste Kraftmaximum unmittelbar nach dem Aufprall zusätzlich. Im weiteren Kraft-Zeit-Verlauf ist dann das Ausmaß der zusätzlich generierten Kräfte sichtbar.

(Nach einem Modell von Seyfarth et al. (1999) macht der passive Aufprall 25% des gesamten Impulses aus. Das zweite „aktive“ Kraftmaximum, wird jedoch im Modell nur durch die federartigen Eigenschaften des Sprungbeines beschrieben.)

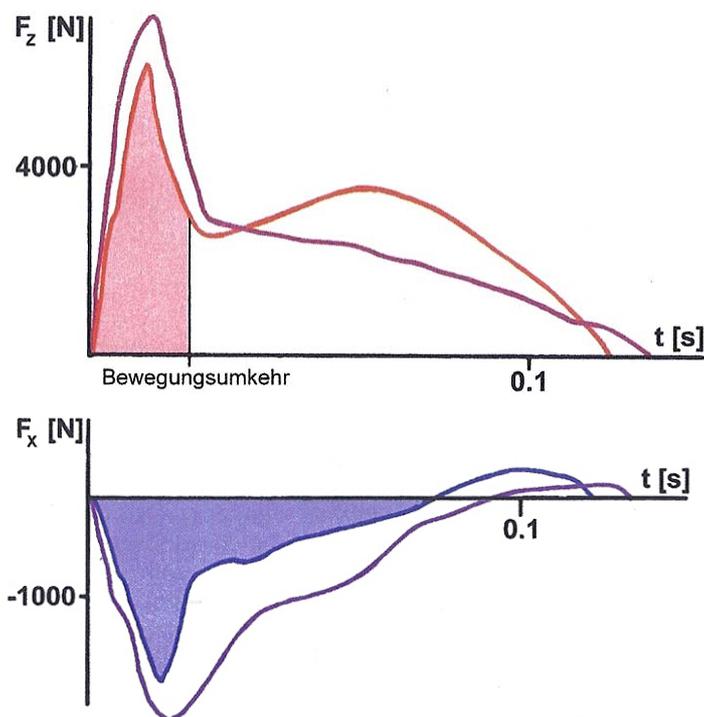


Abb. 2.4: Darstellung guter (hellrote und hellblaue Linie) und schlechter (lilafarbene und dunkelblaue Linie) Kraft-Zeit-Verläufe in horizontaler (F_x , unten) und vertikaler (F_z , oben) Richtung. Zur besseren Veranschaulichung sind die horizontalen Kraftstöße auf der Ordinatenachse größer skaliert (modifiziert nach Wank, 2007).

Senkt der Weitspringer in der Absprungphase zu schnell ab, muss ein entsprechend hoher Kraftanteil zum Abbremsen der Absenkbewegung aufgebracht werden. Dies kann sich wiederum negativ auf die Generierung der konzentrischen Kräfte bei der Absprungstreckung auswirken. Diese beiden Effekte können sich in einem größeren vertikalen Bremsstoß, einem schwächer ausgeprägten exzentrischen Anteil und somit auch dem Kraftzwischenminimum und dem kleineren aktiven zweiten Kraftmaximum widerspiegeln. Dies ist Abb. 2.4 zu entnehmen. Die Möglichkeiten der Ausprägung von Kraft-Zeit-Verläufen sind in der Abbildung mit einer weiteren Linie exemplarisch dargestellt.

Die Richtung der resultierenden Kraftvektoren verläuft während der Stützphase anfangs meist hinter dem Körperschwerpunkt, wodurch eine Vorwärtsrotation entsteht. Im letzten Drittel des Absprungs verschiebt sich die resultierende Kraftwirkung vor den Körperschwerpunkt, womit der Springer eine Rückwärtsrotation erfährt. Bei einer günstigen Körperachsenneigung im Absprung können die Drehimpulse durch die

Rotationsumkehr weitgehend aufgehoben werden, so dass in der Flugphase nur geringe Drehimpulse ausgeglichen werden müssen und die Landeverluste gering bleiben.

Den in Tab. 2.1 aufgeführten Untersuchungen zufolge werden im Bereich der Weltklasse (Sprungweite > 8.00m) bei den Männern horizontale Abfluggeschwindigkeiten im Bereich von 9m/s, bei den Frauen (Sprungweite > 6.60m) etwa 8m/s erreicht. Die Abfluggeschwindigkeiten in vertikale Richtung liegen bei den Männern im Mittel bei 3.2m/s und den Frauen bei 3.1m/s. Nachwuchsathleten fliegen vergleichsweise nur gering langsamer ab, während Mehrkämpferinnen und Mehrkämpfer mit einer mittleren vertikalen Geschwindigkeit von 2.9m/s das Brett verlassen (Nixdorf & Brüggemann, 1983). In Untersuchungen von Endkampfteilnehmern der WM von Müller und Brüggemann (1998) wurden bei vergleichbaren horizontalen Abfluggeschwindigkeiten tendenziell höhere Werte für die vertikalen Komponenten, mit im Mittel 3.41m/s bei den Männern und 3.11m/s bei den Frauen, gemessen. Die Abflugwinkel lagen zwischen 19° und 24°. In Tab. 2.4 sind Abfluggeschwindigkeiten und Abflugwinkel der besten Sprünge als Ergänzung zu Tab. 2.2 dargestellt.

Tab. 2.4: Gesamtabfluggeschwindigkeit $v_{\text{ges,Abflug}}$ und Abflugwinkel α_{Abflug} von Sprüngen der besten Athleten (vgl. Hay, 1993)

Athleten	W [m]	$v_{\text{ges,Abflug}}$ [m/s]	α_{Abflug} [m/s]
Mike Powell (1991)	8.95	9.8	23.2
Carl Lewis (1991)	8.91	10.2	18.3
Bob Beamen (1968)	8.90	9.6	24.0
Carl Lewis (1984)	8.79	10.0	18.7

Die statistischen Zusammenhänge zwischen den oben genannten Absprungparametern und der Weitsprungweite sind abhängig vom Leistungsniveau der Springer. Im Spitzenbereich lassen sich, wie zu erwarten, Zusammenhänge zwischen der horizontalen Abfluggeschwindigkeit und der Sprungweite mit $r = 0.73$ (Nixdorf & Brüggemann, 1990) nachweisen.

Während in horizontaler Richtung die Anfangsgeschwindigkeit in der Stützphase abgebremst, das heißt reduziert wird, nimmt die Geschwindigkeit ab dem Stützbeginn in vertikaler Richtung zu. Lees et al. (1994) berechnen anhand von Weitsprüngen des Finales der World Student Games, dass in der Phase der Absprungbeugung, das heißt vom Aufsatz bis zum minimalen Kniewinkel, im Mittel bereits 64% der gesamten vertikalen Abfluggeschwindigkeit erzeugt werden. Der Mechanismus des „Hebelns“ während der Beugephase stellt demnach für die Autoren den wichtigsten Anteil der Umsetzung der Anlaufgeschwindigkeit in die Abflugrichtung dar.

Über das optimale Verhältnis der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten im Abflug besteht in der Literatur kein Konsens. Während von vielen Autoren (Ballreich, 1970; Kollath, 1980; Müller & Brüggemann, 1998) der vertikalen Abfluggeschwindigkeit die größere Bedeutung zugesprochen wird, wird nach Ballreich (1979) im höchsten Leistungsbereich der horizontalen Abfluggeschwindigkeit der dominanter Einfluss zugeschrieben. Dies begründet er damit, dass auf diesem Niveau die Variationsbreite der vertikalen Abfluggeschwindigkeit gegenüber der horizontalen Geschwindigkeit sehr gering ausfällt. Untersuchungen mit weniger homogenen Stichproben, die für die vertikale Komponente eine größere Variationsbreite aufweisen, kommen zu einer höheren Bedeutung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente (vgl. Nixdorf & Brüggemann, 1983). Eine Studie mit Zehnkämpfern von Brüggemann und Nixdorf (1985) belegt zwischen der vertikalen Abfluggeschwindigkeit und Sprungweite einen Zusammenhang mit $r = 0.83$.

Nach Nixdorf und Brüggemann (1983) muss für das Erreichen einer großen vertikalen Abfluggeschwindigkeit die vertikale Auftreffgeschwindigkeit des Körperschwerpunktes in der Absprungvorbereitung möglichst gering gehalten werden, während zugleich der vertikale Arbeitsweg des Absprungs durch die Körperschwerpunktabsenkung vergrößert werden muss. Angesichts des kleinen Streubereichs der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit scheint der kausale Zusammenhang dieses Parameters zur Abfluggeschwindigkeit jedoch nicht schlüssig. Letztlich entscheiden außerdem die individuellen Voraussetzungen der Athleten darüber, wie und mit welcher Qualität bestimmte Anfangsparameter umgelenkt werden können.

Die vertikale Auftreffgeschwindigkeit ist wiederum abhängig vom Platzieren des Absprungbeines, somit auch dem Stemmwinkel, und der maximalen Beugung des Sprungbeinknies (Coh et al., 1997). Studien von Coh et al. (1997) sowie Müller & Brüggemann (1998) bestätigen darüber hinaus, dass die Genauigkeit der Platzierung des Sprungbeines in Relation zum Absprungbalken ein Kriterium ist, worin sich bessere von weniger guten Springern unterscheiden.

Die Stützzeit im Absprung ist geprägt von der Technik, der Anlaufgeschwindigkeit und der Masse des Springers. Analysen können demnach nur unter Berücksichtigung der Konstitution der Springer vorgenommen und verglichen werden. Nach den vorliegenden Studien dauert die Stützzeit zwischen 0.10s und 0.14s (Nick et al., 1973; Bosco et al., 1976; Ballreich & Brüggemann, 1986). Signifikante Zusammenhänge bestehen weder zwischen der Bodenkontaktzeit und der effektiver Sprungweite ($r = -0.64$) noch zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und der Bodenkontaktzeit ($r = -0.43$) (Nigg et al., 1973).

Bei Analysen der Bodenreaktionskräfte berechnen Luthanen und Komi (1979) signifikante Unterschiede zwischen den Kraftmaxima von Weitspringern mit nationalem ($n = 8$ Sprünge) und regionalem ($n = 6$ Sprünge) Leistungsniveau. Der Vergleich der beiden Gruppen bestätigt dabei, dass Springer der nationalen Klasse größere horizontale $F_{x,Min}$ und vertikale $F_{z,Max1}$ Bremskräfte sowie größere vertikale Beschleunigungskräfte $F_{z,Max2}$ erreichen. Ein Auszug dieser Ergebnisse ist in Tab. 2.5 zusammengefasst. (Zur besseren Veranschaulichung der Kraftmaxima und -minima siehe Abb. 3.10)

Tab. 2.5: Kraftwerte mit Mittelwerten und Standardabweichungen für unterschiedliche Leistungsniveaus (aus Luthanen & Komi, 1979).

Maximalkräfte während des Absprungs [N]	Nationales Niveau der Athleten (M: $W = 6.95m$)	Regionales Niveau der Athleten (M: $W = 5.92m$)	Signifikanz der Unterschiede
$F_{x,Min}$ des horizontalen Bremsanteils	-3358 \pm 402	-1741 \pm 214	$p < 0.01$
$F_{x,Max}$ des horizontalen Beschleunigungsanteils	1028 \pm 57	863 \pm 95	nicht signifikant
$F_{z,Max1}$ des vertikalen Bremsanteils	8163 \pm 355	5800 \pm 653	$p < 0.05$
$F_{z,Max2}$ des vertikalen Beschleunigungsanteils	3508 \pm 91	2001 \pm 65	$p < 0.001$

Im Vergleich von Spezialisten, Zehnkämpfern und Nachwuchsathleten beschreiben Brüggemann et al. (1982) deutliche Unterschiede im Zwischenminimum $F_{z,Min}$ (dem Minimum zwischen dem ersten und zweiten vertikalen Kraftmaximum) und dem zweiten vertikalen Kraftmaximum $F_{z,Max2}$. Sie stellen zwar in der horizontalen $F_{x,Min}$ und vertikalen Bremsphase $F_{z,Max1}$ keine nennenswerten Unterschiede fest, allerdings beschreiben sie einen engen Zusammenhang zwischen der Sprungweite und dem zweiten vertikalen Kraftmaximum $F_{z,Max2}$. Statistische Belege legen die Autoren dazu jedoch nicht vor.

Bei Analysen der Sprungbeinbeugung und -streckung dokumentieren Lees et al. (1994), dass sich bei Spezialisten das Knie des Sprungbeins nach dem Auftreffen um $21.8^\circ \pm 4.2^\circ$ beugt und der Körperschwerpunkt sich dabei um 4cm absenkt. Dies entspricht mittleren Kniewinkeln beim Auftreffen von $165.9^\circ \pm 3.9^\circ$ und Kniewinkeln im tiefsten Punkt von $144.1^\circ \pm 5.1^\circ$.

In dieser Absprunghase bewegt sich das Schwungbein bei hochqualifizierten Springern ausschließlich nach oben (Ballreich & Brüggemann, 1986). Bei leistungsstärkeren Springern verringert sich durch das starke Beugen im Kniegelenk des Schwungbeins das Trägheitsmoment, so dass hohe Winkelgeschwindigkeiten im Hüftgelenk erreicht werden (Brüggemann et al., 1982). Nach den Autoren können mit hohen Winkelgeschwindig-

keiten im Hüftgelenk dann zum einen Teilimpulse des Schwungbeins in vertikale Richtung auf den Körper übertragen, aber auch die Generierung der Rückwärtsrotation des Körpers verstärkt werden. Konkrete Werte und Belege liefern die Autoren dazu nicht.

Bei männlichen Finalteilnehmern der World Student Games stellen Lees et al. (1994) einen aktiven Fußaufsatz des Sprungbeines fest, der eine in Relation zur Körperschwerpunktsgeschwindigkeit negative Horizontalgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Aufsatzes aufweist. Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Knies beträgt dabei 3.26m/s bei einer mittleren horizontalen Anfangsgeschwindigkeit von 9.88m/s. In den Untersuchungen von Koh & Hay (1990) wurde zum Stützbeginn des Absprungs ein weniger aktiver Fußaufsatz gemessen, als in den beiden vorletzten Anlaufschritten. Außerdem bedingt darüber hinaus, den Untersuchungen der Autoren zufolge, bei Spezialisten die Stemmpositionsweite (Abstand zwischen Fußaufsatz des Sprungbeines und der Vertikalen durch den KSP beim Einstemmen) eine weite Sprungleistung. Allerdings konnte dieser Zusammenhang nur mit $r = 0.44$ belegt werden ($n = 19$ Sprünge).

Während der Absprunghase erfolgt durch die Bremswirkung eine Reduktion der kinetischen Energie (Lees et al., 1992; Lees, et al., 1994). Brüggemann und Nixdorf (1985) berechnen für die Änderung der kinetischen Energie während des Absprungs in Summe für Spezialisten einen Verlust von 6% und für Zehnkämpfer einen von bis zu 16%. Witters et al. (1991) untersuchten – auf der Datenbasis von Endkampfteilnehmer der WM – anhand eines vereinfachten energetischen Modells, wieviel des Energieverlusts, der durch die horizontale Geschwindigkeitsreduktion entsteht, durch positive Arbeit des Sprungbeins in vertikale Richtung dazugewonnen werden kann. Sie berechneten für die „Umwandlung“ der kinetischen Energie eine Effizienz von 0.2 bis 0.3, was bedeutet, dass vom kinetischen Energieverlust auf der horizontalen Ebene nur maximal 30% auf der vertikalen Ebene wieder zurückgewonnen werden konnten. Demnach beurteilen sie das Federverhalten des Sprungbeins selbst bei Spezialisten als relativ schlecht. Die Energieberechnung berücksichtigt dabei jedoch weder die potentielle Energie, noch die Rotationsenergie und die Energie der Teilkörperbewegungen.

Untersuchungen zur Muskelaktivierung vor und während des Weitsprungabsprungs, die Aufschluss über die Innervation der Beinbeuge - und Beinstreckmuskulatur geben, liegen kaum vor. Dass vor der exzentrischen Phase des Sprungbeines die Vorinnervation der Muskulatur zur Bildung der „Short Range Elastic Stiffness“ (SRES) führt und Dehnungsreflexe für eine zusätzliche Aktivierung der Muskulatur sorgen, kann angenommen werden. Die SRES befähigt den Muskel kurzzeitig der Dehnung zu

widerstehen, sofern die Dehnungsamplitude nicht zu groß wird (vgl. Schmidtbleicher, 1987). Dehnungsreflexe sorgen dann für eine zusätzliche Aktivierung der Muskulatur und durch zusätzliche Querbrückenbildung für die Erhöhung der Kontraktionskraft. Mit Reflexantworten (des Dehnreflexes) ist jedoch erst kurz nach dem Aufprall zu rechnen. Für die erste Phase kann demnach nur die vorinnervierte Muskulatur den Bremskräften beim Aufprall entgegenwirken. Ein Teil der konzentrischen Widerstandsfähigkeit in der Beugephase wird von den Sehnen geleistet. Durch spezielles Training werden nicht nur Muskeln, sondern auch Sehnen nahezu idealelastisch und können dadurch (durch die größere Steifigkeit) mehr Energie speichern (Klein & Sommerfeld, 2004).

Anhand der Studien zur Absprungbewegung des Weitsprungs ist zusammenfassend festzuhalten, dass sich trotz der umfassenden wissenschaftlichen Belege, der theoretischen Berechnungen und der daraus resultierenden, präzisen Vorstellung der technischen Ausführung der Weitsprungbewegung dennoch abweichende, erfolgreiche individuelle Lösungswege zeigen. Dass gleiche Weiten mit unterschiedlichen Sprungtechniken erreicht werden können (vgl. Seyfarth et al., 1999), belegen auch hier der bis dato aktuelle Weitsprung-Weltrekordhalter Mike Powell (8.95m) und Carl Lewis (8.91m) im Endkampfduell der Weltmeisterschaft in Tokio 1991. Bei gleicher Anlaufgeschwindigkeit und einer nur geringen effektiven Sprungweitendifferenz zeigen die beiden häufig untersuchten Sprünge deutliche Unterschiede in den Absprungparametern und den Körperschwerpunktverläufen. Für diese Weitsprünge fanden Fukashiro und Wakayama (1992) Differenzen in der horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeit, dem Abflugwinkel und dem Verwringungswinkel von Schulter und Hüfte. Andere Wettkampfdiagnostiken bei Spezialisten zeigen ebenso inter- und intraindividuelle Unterschiede der Absprungparameter und bedingt auch der Weiten (u.a. Nixdorf & Brüggemann, 1990; Müller & Brüggemann, 1998). Bei den Unterschieden berufen sich die Autoren vor allem auf die Geschwindigkeitskomponenten im Abflug, den Abflugwinkel und die beiden letzten Schritte im Anlauf.

2.1.4 Flugphase und Landung

Die Flugphase dient dazu, die Landung so vorzubereiten, dass diese ohne Weitenverlust gelingt. Dazu sollte die Landestelle möglichst nah beim Schnittpunkt der theoretischen Flugbahn mit dem Boden liegen. Die Flugbahn des Körperschwerpunkts wird durch die Anfangsbedingungen beim Abflug, durch die Abfluggeschwindigkeit v_{Abflug} , die Anfangshöhe des Körperschwerpunktes z_0 und den Abflugwinkel α_{Abflug} festgelegt

(siehe Abb. 2.5). Abweichungen der Flugbahn können sich im Prinzip dann nur noch durch unterschiedliche Windverhältnisse ergeben. In Abb. 2.5 sind auf der Abszisse die Teilweiten in Bezug auf den Körperschwerpunktsverlauf in der Flugphase gekennzeichnet. Während die Flugweite x_{weite} die Distanz beschreibt, auf der der Körperschwerpunkt eine symmetrische Flugbahn zurücklegt, beschreiben die Absprungpositionsweite x_0 und die Landepositionsweite oder Landeversatz x_L die Positionen, in denen die Beine Kontakt zum Boden haben.

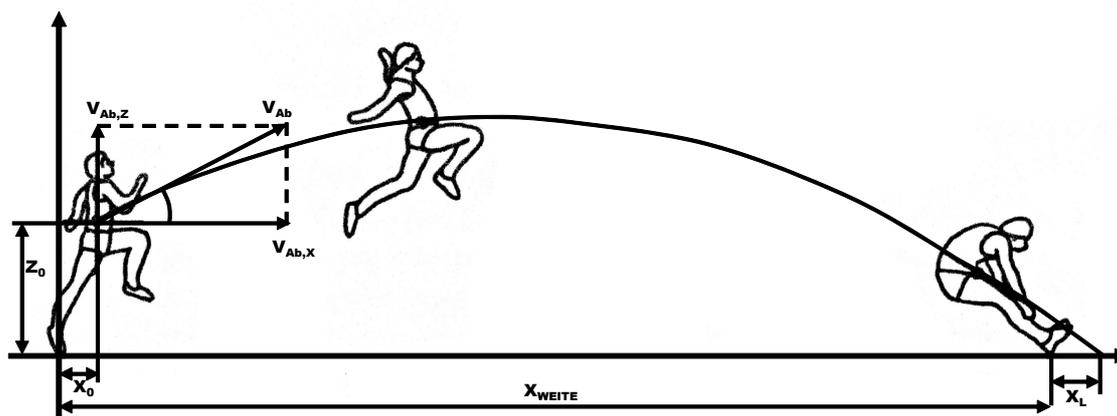


Abb. 2.5: Parameter und Bahnverlauf der theoretischen Flugbahn des KSPs (modifiziert nach Ballreich & Brüggemann, 1986).

Die unterschiedlichen Weitsprungflugtechniken haben keinen Effekt auf die Flugbahn, sondern dienen nur der Stabilisierung des Körpers während der Flugphase. In der Flugphase wird zwischen den Techniken Schrittsprung, Hangsprung und Laufsprung unterschieden, wobei der Schrittsprung nur bei Anfängern zu sehen ist.

Beim Hang- und Laufsprung wird nach dem exzentrischen Überstrecken des Hüft-Rumpfwinkels in der Flugphase die Landung durch eine klappmesserartige Bewegung eingeleitet, wodurch Oberkörper und Beine besser zusammengebracht werden können. Aufgrund der im Absprung nicht gänzlich ausgeglichenen Drehmomente besitzt der Springer in der Flugphase häufig noch einen Drehimpuls. Dieser kann durch die Laufsprungbewegung besser kompensiert werden als durch die statische Haltung beim Hangsprung oder Schrittsprung. Der Laufsprung lässt sich jedoch aufgrund der benötigten Flugzeit nur bei Sprüngen ab 5m praktizieren. Um die Vorteile der Technik zu nutzen, wird in den Hangsprung oft ein weiträumiger Laufschrift mit dem Schwungbein eingebaut. Die Schrittsprungtechnik bringt bei einer langen Flugphase oft zusätzlich Instabilität mit sich und wird deshalb im Leistungssport kaum verwendet.

Das Landeverhalten beim Weitsprung wird in den meisten Untersuchungen im Hinblick auf die Effektivität betrachtet und somit in Bezug zur theoretisch errechneten Sprungweite gesetzt. Ob die Landung eines Sprunges optimal gelingt, hängt stark von den im Absprung geschaffenen Voraussetzungen ab. Simulationen von Mendoza (1989) zeigen, dass die optimale Landeposition durch ein stark gebeugtes Hüftgelenk, möglichst gestreckte Beine und der Armhaltung hinter dem Körper charakterisiert sein sollte.

Bei den Bundesleistungsdiagnostiken wird neben den beschriebenen Leistungskriterien auch ein Landeindex berechnet. Dieser beschreibt die Summe der beiden Verhältnisse Landehöhe h_L zu Landepositionsweite W_4 und Hüfthöhe $h_{Hü}$ zu Hüftweite $W_{Hü}$ und beurteilt somit die Qualität des Landeverhaltens (siehe Abb. 2.6). Als Richtwert definiert der Autor, dass Landungen ohne Weitenverlust nach dem ersten Bodenkontakt einen Landeindex von größer 1.5 aufweisen. Dieser Wert wurde empirisch erhoben.

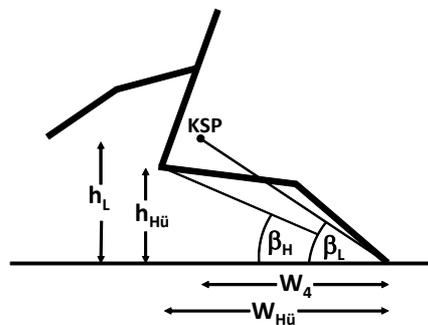


Abb. 2.6: Parameter zur Bestimmung des Landeindex (Mendoza, 1998).

2.2 Training und Diagnostik des Weitsprungs

Ziel der Leistungsdiagnostik ist, den aktuellen Leistungszustand einerseits zu kontrollieren und andererseits das Training den Ergebnissen entsprechend für den nächsten Zyklus zu planen und individualisiert zu steuern. Idealerweise wird die Trainings- und Wettkampfplanung zum Saisonbeginn fixiert und die Leistungsüberprüfungen daraufhin systematisch und zu bestimmten Zeitpunkten in der Saison abgestimmt. Bei mehrjähriger Planung ist für eine gute Vergleichbarkeit eine Standardisierung der Zeitplanung sinnvoll.

Die komplexen Leistungsdiagnosen (insbesondere die biomechanische) terminlich so zu planen, dass diese Ansprüche im Sinne der spezifischen Wettkampfplanung allen

Athleten einer Trainingsgruppe gerecht werden, stellt sich dabei als schwierig dar. Nicht zu vergessen sind die weiteren Leistungsüberprüfungen, wie beispielsweise Test- oder Trainingswettkämpfe, die ebenfalls in der Gesamtplanungen berücksichtigt werden müssen.

2.2.1 Inhalte des Weitsprungtrainings

Eine optimale Leistung im Weitsprung ist nur aus einer sehr gut ausgeprägten Sprint- bzw. Anlauffähigkeit und mit einer hoch entwickelten reaktiven Sprungkraft möglich (Knapp, 2008). Gerade bei den Wettkampfsprüngen wirken in der Absprunghase enorme Kräfte auf den Stütz- und Bandapparat, die vom Athleten abgefangen werden müssen. In kurzer Zeit müssen dann zusätzlich möglichst große Kräfte in vertikaler Richtung generiert werden. Entsprechende Fähigkeiten und Fertigkeiten müssen vorrangig im Training entwickelt werden.

Ein komplexer Planungsvorschlag für das Aufbautraining der Sprungdisziplinen von Czingon (1995) enthält beispielsweise in zwei Trainingsphasen allgemeines Krafttraining sowie Krafttraining an und mit Geräten neben beidbeinigen, wechselbeinigen und einbeinigen Sprungformen und speziellem Sprungkrafttraining.

Eine besondere Rolle spielen die Horizontalsprünge im Weitsprungtraining (vgl. Knapp, 2008; Killing et al., 2005; Schütze, 2001; Gehrke, 1997). Nach Knapp (2008) können sie dem Techniktraining sowie dem speziellen Sprungkrafttraining zugeordnet werden, denn sie zielen neben der Kraftentwicklung (insbesondere für die Beinstreckung) gleichermaßen auf technische Elemente (z.B. Schulung des aktiv greifenden Fußaufsatzes oder Kniehub) ab (vgl. Gehrke, 1997). Während sich die Mehrfachsprünge durch ihren intensiven Trainingsreiz kennzeichnen, steht bei einzelnen Steige- oder Weitsprüngen eher die konditionsfördernde Komponente im Vordergrund.

Zur Vorbereitung der Muskulatur auf die hohen Zugspannungen wird vor allem im höheren Leistungsniveau zusätzlich das Sprungkrafttraining unter Einbeziehung von Zusatzgeräten und erschwerten Bedingungen (z.B. Sprünge im Sand, bergan, mit Gewichtsmanschetten oder Gewichten, Kastensprünge, Sprünge mit Anlaufverlängerung, Niedersprünge) durchgeführt (Schottke, 2002). Das Training spricht dann durch die betont exzentrische Muskelarbeit auch mehr die reflektorische Muskelantwort an. Sprungformen aus schnellem Anlauf bzw. aus größeren Fallhöhen sind aufgrund der hohen Belastungen allerdings erst zum Ende des Jugend- und Aufbautrainings vorgesehen (Gehrke, 1997).

2.2.2 Konzeption und Ziele der Leistungsdiagnostik

Die Leistungsüberprüfungen der Kaderathleten im Weitsprung bestehen aus der Trainings- und der Wettkampfdiagnostik. Während in der klassischen Leistungsdiagnostik, bzw. in der Trainingsdiagnostik, in einer Testbatterie neben den verschiedenen Zubringerleistungen sowohl kinematische als auch dynamische Analysen der Weitsprungtechnik von Trainingsprüfungen durchgeführt werden, beschränken sich die Wettkampfdiagnostiken auf die Auswertung kinematischer Parameter und teilweise Teilzeitenmessungen des Anlaufs. Die bundesweite Leistungsdiagnostik für Kaderathleten finden zweimal jährlich statt. Wettkampfanalysen werden oft an Meisterschaftswettkämpfen durchgeführt. Beide Diagnostiken dienen dem intra- und interindividuellen Vergleich der Weitspringer. Dabei orientieren sie sich vor allem an Norm- und Sollwerten. Anhand der Ergebnisse können Trainingsqualität und Leistungsstand der Athleten überprüft und gezielte Interventionen im Training eingebaut werden.

Die klassischen Zubringerleistungen der Testbatterie sind 30m fliegend, 60m Sprint, 5er-Hop rechts und links, 5er Sprung, 10er Sprunglauf, Drop Jump, Counter Movement Jump und Kraftdiagnostik der Beinstrecker. In der Bundesleistungsdiagnostik werden die in Tab. 2.6 aufgeführten Leistungsparameter der Weitsprünge erhoben.

Die in der Testbatterie erhobenen Zubringerleistungen lassen jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf die Sprungweite oder auf leistungsbestimmende Faktoren zu. Hohe Korrelationen zur Weitsprungweite lassen sich nur in den Sprinttests oder den Horizontalprüfungen nachweisen. Für die Vertikalsprünge, wie den Drop-Jump oder Counter-Movement-Jump, liegen keine signifikanten Korrelationen zur Sprungleistung vor.

Mit dem Drop Jump werden reaktive Voraussetzungen für Springer abgeprüft. Die Sprungleistung wird durch die Schnellkraftfähigkeit im kurzen Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus bestimmt. Die Muskulatur arbeitet exzentrisch-konzentrisch, angestrebt wird neben der Sprunghöhe eine möglichst kurze Bodenkontaktzeit. Leistungsbestimmende Faktoren sind vor allem die Fähigkeit der maximalen Kraftentwicklung, der Kraftanstieg (rate of force development) nach dem Aufprall sowie die elastischen Eigenschaften des Muskel-Sehnen-Systems und der Dehnungsreflex. Beim Counter Movement Jump werden durch die exzentrisch-konzentrisch arbeitende Muskulatur bei mittlerer Vertikalgeschwindigkeit und relativ starker Kniebeugung vor allem die Schnellkraftleistung im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus geprüft. Daher wird die Sprungleistung des Counter Movement Jumps durch das dynamisch realisierbare Kraftmaximum und somit der Maximalkraft und möglicherweise auch durch die elastischen Eigenschaften der tendo-muskulären Strukturen limitiert.

Tab. 2.6: Übersicht der gemessenen und berechneten Parameter der Leistungsdiagnostik im Weitsprung des Olympiastützpunkts Frankfurt-Rhein-Main.

Testparameter	Erklärung
Weiten	
offiziell	gemessene Wettkampfweite
theoretisch	theoretisch mögliche Sprungweite (errechnet anhand der erzielten maximalen Anlaufgeschwindigkeit)
effektiv	Summe aus der offiziellen Sprungweite und dem Weitenverlust am Balken beim Absprung
Verlust Absprung	Entfernung zwischen Fußspitze des Sprungfußes und der vorderen Kante des Absprungbalkens
Verlust Landung	Weitenverlust durch Zurückfallen in den Sand während der Landeausführung
Schrittlängen	
3L/ 2L/ 1L	Länge des dritt-, zweit- und letzten Anlaufschrittes
Relation 2./3. bzw. 1./2.	Längenverhältnis des zweit- und drittletzten bzw. letzten und zweitletzten Schrittes
KSP-Absenkung	Absenkung des KSP zu Beginn des Absprungs im Vergleich zum Beginn des drittletzten Schrittes
Geschwindigkeiten	
3L/ 2L/ 1L	Horizontalgeschwindigkeit im dritt-, zweit- und letzten Anlaufschritt
horizontale Abfluggeschwindigkeit	horizontale Abfluggeschwindigkeit des KSP
Verlust im Absprung	Verlust an Horizontalgeschwindigkeit während des Absprungs
vertikale Abfluggeschwindigkeit	vertikale Abfluggeschwindigkeit des KSP
Gewinnkoeffizient Vertikalgeschwindigkeit	Vergleich der erzeugten vertikalen Abfluggeschwindigkeit im Verhältnis zum Verlust an Horizontalgeschwindigkeit
Absprung	
Dauer	Dauer des Absprungs (Stützzeit)
Stemmwinkel	Winkel zwischen KSP, Ferse des Sprungfußes und der Vertikalen zu Beginn des Absprungs
Rumpfwinkel	Winkel des Rumpfes zu Beginn des Absprungs
Rumpffrotation	Drehwinkel des Rumpfes um die Breitenachse des Körpers vom Beginn des Absprungs bis zum Abflugzeitpunkt
min. Kniewinkel	kleinster Kniewinkel in der Amortisationsphase
Abflugwinkel	Abflugwinkel des KSPs
Schwungbein	
Winkel	Lagewinkel des Schwungbeinoberschenkels zur Horizontalen zum Abflugzeitpunkt
Geschwindigkeit	mittlere Winkelgeschwindigkeit des Schwungbeinoberschenkels
Landung	
Landeweite	Horizontale Entfernung zwischen dem KSP und der Ferse des Landefußes zu Beginn der Landung
Landeindex	Verhältnis zwischen Landeweite und Landehöhe
Rumpfwinkel	Winkel des Rumpfes zur Horizontalen zu Beginn der Landung
Kniewinkel	Kniewinkel des Landebeins zu Beginn der Landung
Hüftwinkel	Hüftwinkel zu Beginn der Landung

2.3 Rezension zu bisherigen Studien und Ableitung der Forschungsfragen

Es gibt viele Studien und Publikationen zur Technik und optimalen Realisierung des Weitsprungs. Dennoch fehlen in einigen Bereichen wissenschaftlich belegte Erkenntnisse über relevante Absprungparameter und deren Einflussstärke sowie theoretische Modelle, die in der Praxis einsetzbar sind. Die Untersuchungen konzentrieren sich meist auf die absprungvorbereitende Phase und den Absprung, wobei anhand von Wettkampfdiagnosen Topspringer kinematisch untersucht werden und leistungsbestimmende Parameter meist in Bezug auf die Sprungweite diskutiert werden. Bei derartigen Untersuchungen muss auf die Erhebung dynamometrischer Daten verzichtet werden. Außerdem sind die Vorgaben für eine Akkreditierung mitunter hoch und deshalb die tatsächlichen Messmöglichkeiten oft schon wegen der räumlichen Gegebenheiten während eines Wettkampfes im Stadion eingeschränkt. Eine umfangreiche und präzise biomechanische Untersuchung verlangt für die kinematische Auswertung eine exakte Kalibrierung und Aufzeichnung der Gelenkpunkte für die Körperschwerpunktsbestimmung. Dies ist für Wettkampfdiagnosen in der Regel schwer umsetzbar, da oft die Lichtbedingungen, die Kleidung der Springer, das fehlende Markersystem oder die Möglichkeiten einer guten Kameraposition eine gute Aufnahmequalität einschränken und somit eine präzise Digitalisierung der Gelenkpunkte erschweren. Entsprechend ist bei Wettkampfuntersuchungen ein Qualitätsverlust in Kauf zu nehmen.

Daten aus Leistungsdiagnosen von Kaderathleten werden aus wettbewerbstaktischen Gründen nicht veröffentlicht. Auch Längsschnittuntersuchungen von Leistungsspringern mit mehreren standardisierten Diagnostikterminen innerhalb der Saison konnten bisher nicht systematisch erfasst werden. Entsprechend liegen für die unterschiedlichen Entwicklungsstufen von Nachwuchsspringern nur bedingt wissenschaftlich überprüfte Norm- und Vergleichswerte vor. Wie sich die leistungsrelevanten Parameter von Nachwuchssportlern über einen längeren Entwicklungszeitraum verändern, ist bisher auch nicht publiziert.

In Deutschland werden die Leistungsdiagnosen der leichtathletischen Sprungdisziplinen mit Kaderathleten zentral, in der Regel zwei Mal jährlich innerhalb der Kaderlehrgänge durchgeführt. Die Möglichkeiten, Leistungsspringer zusätzlich für umfangreiche, wissenschaftliche Studien zu gewinnen, in denen beispielsweise Wettkampfsprünge im Training analysiert werden, sind aufgrund logistischer, zeitlicher aber vor allem aus trainingspraktischen Aspekten sowie wegen der spezifischen Vorbereitung auf die

Wettkämpfe, kaum möglich, weshalb viele Studien oft nur auf Messdaten von Studenten oder von Weitspringern niedrigeren Niveaus basieren.

Für eine präzise und umfassende Auswertung der dynamischen Daten müssen die Integrationskonstanten, das heißt die horizontale und vertikale Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts zum Stützbeginn (aus den kinematischen Daten), ermittelt werden. Hierzu müssen das kinematische und dynamometrische Messsystem synchronisiert sein. Die aus den dynamischen Daten gewonnenen Auftreff- und Abflugzeitpunkte können so zur Bestimmung der exakten Abfluggeschwindigkeit des Körperschwerpunkts (aus den kinematischen Daten) verwendet werden. Darüber hinaus können markante Zeitpunkte aus den kinematischen Daten (z.B. vertikale Bewegungsumkehr, kleinster Kniewinkel) mit den Kraftverläufen in Relation gesetzt werden.

In den meisten Studien wird unter anderem wegen des messtechnischen Aufwands auf die Ermittlung der exakten Anfangsgeschwindigkeit als Parametergröße verzichtet. Als Anfangsbedingung wird ersatzweise die horizontale Anlaufgeschwindigkeit vor dem Fußaufsatz herangezogen. Auch hier ist entsprechend mit Fehlern zu rechnen, da somit die vertikale Anfangskomponente vernachlässigt wird.

In welchem „Toleranzbereich“ sich die leistungsrelevanten Merkmale rein rechnerisch für eine bestimmte Sprungweite bewegen können, wurde erst wenig oder nur sehr vereinfacht beschrieben. Welche Möglichkeiten und Strategien bestehen, mit tatsächlichen Anfangsbedingungen oder individuellen Voraussetzungen, die maximale Weite zu erreichen, wird zwar häufig diskutiert, ist aber ebenso bisher nicht abschließend untersucht.

Ein wichtiges Leistungskriterium ist die Relation der Brems- und Beschleunigungsanteile. Untersuchungen, die aus dem vertikalen und horizontalen Kraftstoß die horizontalen Brems- und die vertikalen Beschleunigungsanteile des Absprungs analysieren, liegen nicht vor. In den meisten Analysen wird der horizontale Geschwindigkeitsverlust als adäquates Leistungskriterium herangezogen.

Um die Brems- und Beschleunigungsanteile berechnen zu können, müssen die Zeitpunkte der Bewegungsumkehr des Körperschwerpunktes in vertikaler Richtung sowie die Beschleunigungsumkehr des Körperschwerpunktes in horizontaler Richtung vorliegen. Während für den Zeitpunkt der Beschleunigungsumkehr, der Zeitpunkt des Vorzeichenwechsels von negativer zu positiver Beschleunigung aus den Kraftdaten herangezogen werden kann, muss für die Bestimmung der Bewegungsumkehr die vertikale Anfangsgeschwindigkeit des Körperschwerpunkts bekannt sein. Damit kann dann der exakte Zeitpunkt, bei dem die vertikale Geschwindigkeit des Körperschwer-

punkts gleich 0 ist ($v_z = 0\text{m/s}$), ermittelt werden. Eine Bestimmung der Bewegungs-umkehr mittels Videoanalyse ist zu ungenau. Für genaue Ergebnisse ist demnach auch hier die Synchronisation der kinematischen und dynamischen Messsysteme erforderlich.

Inwieweit die entsprechenden Kraftstoßanteile durch individuelle Sprungmuster gekennzeichnet sind und wie diese mit den unterschiedlichen Sprungstrategien korrelieren, wurde bisher ebenfalls nicht untersucht. Frühere Untersuchungen vergleichen hingegen nur das vertikale Kraftmaximum, das aktive Kraftmaximum sowie das vertikale Kraftminimum und die exzentrische Phase. Zur Stabilität bzw. Reproduzierbarkeit der Kraftstoßanteile konnten ebenso keine Ergebnisse gefunden werden.

Da in vielen Untersuchungen die Anzahl der analysierten Sprünge nur sehr klein ist und außerdem einzelne Athleten oft nur einen Sprung in die Analysen einbringen, konnten bislang weder die Zusammenhänge einzelner leistungsbestimmender Parameter statistisch nachgewiesen, noch die Stabilität der Parameter bei Sprüngen eines Athleten beschrieben werden. Beide Informationen sind jedoch gerade für Leistungsdiagnosen und deren Interpretation von Bedeutung und darüber hinaus Voraussetzung für Prognosen anhand von Istwerten.

Für biomechanische Leistungsdiagnostiken ist insbesondere interessant, wie sich die Technikparameter der Weitsprünge bei niedrigeren Anlaufgeschwindigkeiten, beispielsweise aus einem mittleren Anlauf von 12 Schritten, im Vergleich zu Sprüngen mit Wettkampfanlauf verändern, denn letztlich werden auch im Training anhand von einzelnen Sprüngen, aus meist etwas geringerer Geschwindigkeit, Techniken beurteilt.

Wie der Forschungsstand zeigt, sind trotz der vielseitigen und umfassenden Studien noch einige Fragen zur Biomechanik des Weitsprungs, vor allem was den Leistungsbereich betrifft, unbeantwortet. Dies liegt einerseits an den erforderlichen und aufwändigen Messinstrumentarien sowie andererseits an den erschwerten Messmöglichkeiten im Spitzenbereich. Ausgehend von den festgestellten Forschungsdefiziten wurden für diese Arbeit vier übergreifende Fragestellungen abgeleitet und behandelt:

Im ersten Schritt sollen zunächst grundlegende Erkenntnisse zur genauen zeitlichen Bewegungsabfolge, Zusammenhänge von Einflussgrößen und Phänomene der Absprungbewegung im Weitsprung quantitativ beschrieben und erklärt werden.

Auf dieser Grundlage wird der Frage nachgegangen, welche effektiven Lösungsmöglichkeiten für das Umlenken der Anfangsgeschwindigkeiten in bestimmte Abfluggeschwindigkeitskomponenten für einen ausgewählten, homogenen Leistungs-

bereich bestehen und welche Absprungstrategien sich bei Weitspringern nachweisen und mechanisch begründen lassen. Eine bedeutende Rolle bei der Bewegungsanalyse ist die Stabilität und Reproduzierbarkeit von Folgesprüngen und Sprüngen der Athleten über den Saisonverlauf hinweg, das heißt zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dazu werden die Weitsprünge auf individuelle Muster im Absprungverhalten und deren Veränderungen untersucht.

Der Einfluss der Anlaufgeschwindigkeit auf die Sprungweite ist zwar hinreichend untersucht, die kinematischen und dynamischen Veränderungen im Bewegungsablauf durch unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten sind dabei jedoch bislang nicht betrachtet worden. Im Sinne eines evaluativen Ansatzes soll hierzu die Frage beantwortet werden, wie sich die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf von denen aus dem Wettkampfanlauf unterscheiden.

Ein zentrales Anliegen der umfangreichen, trainingsbegleitenden Untersuchung bestand darin, erstmals die Entwicklungen von Nachwuchsathleten über einen Zeitraum von mehreren Jahreszyklen wissenschaftlich aufzuarbeiten und darzustellen. Interessant ist dabei insbesondere, welche Parameter die Leistungsverbesserung innerhalb der Saison sowie über mehrere Jahreszyklen hinweg begründen.

Kapitel 3

Messverfahren und Analysemethoden

3.1 Untersuchungsgruppe, Organisation und Messablauf

Untersuchungsgruppe

Die biomechanische Leistungsdiagnostik wurde in Form eines Betreuungsprojekts für die Kaderathleten der Disziplingruppe Sprung am Olympiastützpunkt Stuttgart durchgeführt. Der Olympiastützpunkt Stuttgart ist in Baden-Württemberg neben Mannheim einer der Bundesstützpunkte der Sportart Leichtathletik. Durch die umliegenden Talentstützpunkte und Fördergruppen in Stuttgart, Kornwestheim-Ludwigsburg, Sindelfingen, Tübingen, Alb-Neckar, Albstadt und Pforzheim stellt der Olympiastützpunkt in Stuttgart mit dem dort ansässigen Landestrainer ein Ballungszentrum für Kaderathleten im Bereich der leichtathletischen Sprungdisziplin dar. Für wissenschaftliche Untersuchungen im Leistungsbereich standen demnach eine außergewöhnlich große Anzahl an Athleten mit höherem Leistungsniveau für die Untersuchungen zur Verfügung.

In den Saisonverläufen 07/08, 08/09 und 09/10 wurden Weitsprünge von insgesamt 32 männlichen und weiblichen Kaderathleten ausgewertet und analysiert. Die Athleten gehörten in diesem Zeitraum zum D- bis A-Kader der Disziplingruppe Sprung des DLV. Vorrangig bestand die Gruppe aus Weitspringern, dazu kamen einige Drei- und Hochspringer. Im Laufe des Betreuungsprojekts kristallisierte sich ein ausgewählter

Kader von 12 Springerinnen und Springern heraus, an dem die Diagnosetermine dann orientiert wurden. Über die Laufzeit des Betreuungsprojekts wurden insgesamt 265 Sprünge ausgewertet. Für die verschiedenen wissenschaftlichen Fragestellungen wurde die Athletengruppe in weitere Untergruppen unterteilt.

Organisation und Messablauf

Die biomechanischen leistungsdiagnostischen Messungen fanden über die Saison verteilt an vier bis fünf Terminen von September bis Juli statt. Die meisten Athleten planten eine Doppelperiodisierung. Somit waren zu den Terminen im Januar und im Juli Leistungsspitzen zu erwarten. Weitere Termine waren im Oktober und April sowie im Laufe der Freiluftsaison während eines Wettkampfes. Die Messtermine wurden mit dem Kadertrainer vom OSP entsprechend der Trainings- und Wettkampfplanung abgesprochen und in den Wochenzyklus eingeplant.

Zu den einzelnen Messterminen wurden Weitsprünge aus dem kurzen Anlauf (7–8 Schritte) und dem mittleren Anlauf (11–12 Schritte) durchgeführt. Die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf (individuelle Schrittzahl) wurden erst ab Dezember, also vor den Hallenmeisterschaften, zur Testbatterie hinzugenommen, da in der Vorbereitungsperiode, aufgrund der noch fehlenden spezifischen Trainingseinheiten, nicht aus maximalen Anlaufgeschwindigkeiten gesprungen werden konnte. Für die Vergleiche und die Auswertungen der Entwicklungsverläufe über die Saison wurden deshalb auch die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf herangezogen. Von jeder der drei Anlaufängen wurden an den jeweiligen Messterminen in der Regel zwei gültige Sprünge aufgezeichnet.

Im Anschluss an die Vermessung der Weitsprünge wurden außerdem Zubringerleistungen anhand der Vertikalsprünge Drop Jump und Counter Movement Jump ermittelt. Zusätzlich wurde über eine Saison das Umsetzen mit der Langhantel, zur Messung der Schnellkraft für die Parameter Hantelhöhe und Zuggeschwindigkeit, in der Testbatterie integriert. In der nächsten oder folgenden Trainingseinheit wurden vom Landestrainer die Einzeltests: 30m fliegend, 5er-Hop mit dem rechten und linken Bein sowie 10er-Sprunglauf durchgeführt und im Untersuchungsprotokoll ergänzt.

Messplatz

Der Messplatz zur Erfassung der biomechanischen Leistungsparameter wurde in der Molly-Schauffele Halle am Olympiastützpunkt in Stuttgart vor der dreijährigen Laufzeit des Betreuungsprojekts in Absprache mit dem Landestrainer eingerichtet, entwickelt und

evaluiert. Das Messplateau bestand aus vier Analysetools, die miteinander verbunden waren. Dazu gehörten die Kinematographie, die Dynamometrie und die Geschwindigkeitsmessung mittels Lichtschranken und Lasermessung. Abb. 3.1 zeigt den Aufbau des Messplatzes mit der aufgebauten Messtechnik für die Analyse der Weitsprünge.

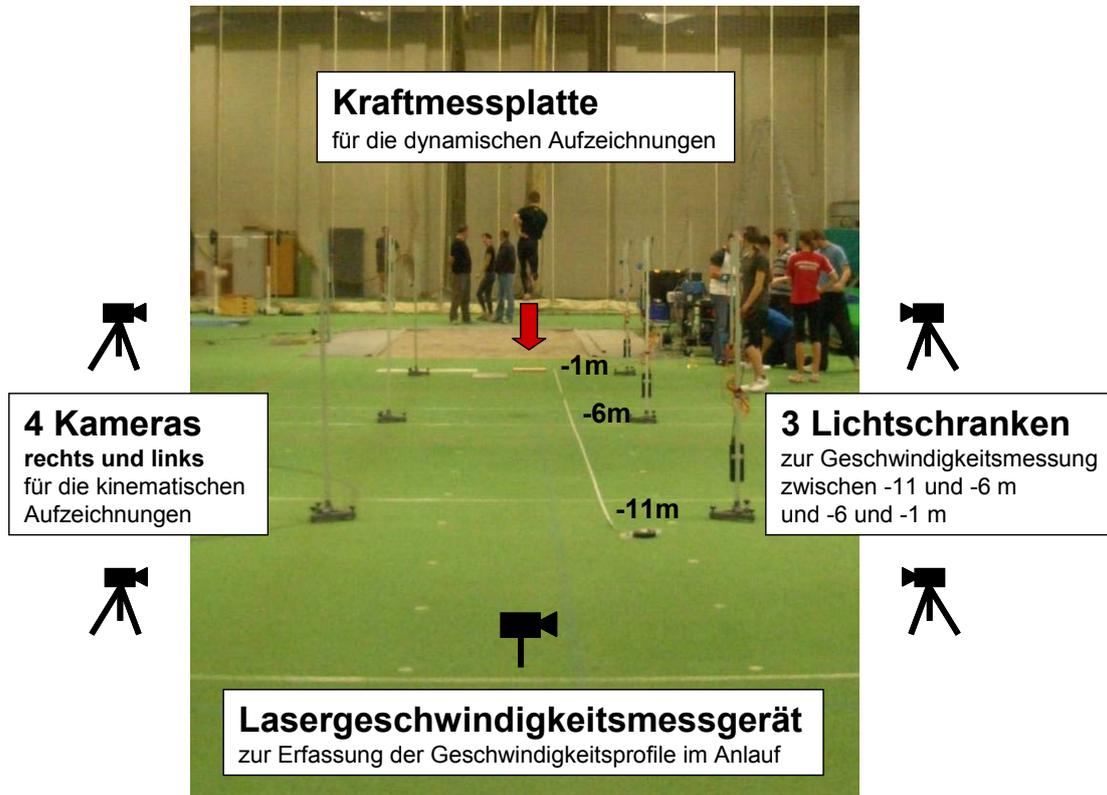


Abb. 3.1: Messaufbau für Weitsprünge aus verschiedenen Anlaufängen.

3.2 Datenerfassung und Datenverarbeitung

3.2.1 Kinematographie

Die kinematischen Daten wurden als 2D-Videoaufnahmen mit digitalen Hochfrequenz-Videokameras (Basler A 602f, 100 fps) erfasst. Dabei standen zwei Kameras auf Höhe des Absprungbalkens rechts und links (siehe Abb. 3.1). Der aufgenommene Bildausschnitt umfasste den vorletzten Anlaufschritt und den Absprung, was etwa einem Datenmaterial von etwa 70 aufgenommenen Bildern für jede Seite entspricht. Die beiden anderen

Kameras standen in Anlaufrichtung rechts und links in etwa 8m Entfernung zum Absprungbrett, um die zweite Hälfte des Anlaufs zu erfassen. Die Aufzeichnungen erfolgten mit der Software SimiMotion. Die Kameras wurden über ein extern gegebenes Steuersignal synchronisiert.

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurden für die linke und rechte Körperhälfte separate Kameras genutzt und die Markerpunkte für die rechte und linke Körperseite entsprechend separat kalibriert und digitalisiert. Somit konnte eine bessere Sichtbarkeit der Gelenkpunkte garantiert werden. Für die Erfassung der Gelenktrajektorien minimieren sich vor allem auch die Tiefenachsenfehler. Die Bildausschnitte von der Anlauf- und Absprunghase wurden als zeitdiskrete Rohdaten für jede Körperseite bildgenau zeitlich zusammengefügt.

Aus den Videodaten wurden auf der Basis eines Menschenmodells mit 19 Markerpunkten (siehe Abb. 3.2) die Gelenkkoordinaten, Gelenkwinkel, Winkelverläufe und Winkelgeschwindigkeiten sowie die Körperschwerpunktkoordinaten und die Körperschwerpunkttrajektorien berechnet. Der Berechnung des Körperschwerpunkts liegt die Massenverteilung der Körpersegmente von Zatsiorsky (2002) zugrunde.

Aus dem horizontalen Geschwindigkeits-Verlauf des Körperschwerpunkts ist das Umsetzen der Anlauf- in die Anfangsgeschwindigkeit und das Abbremsen des Körperschwerpunkts nach dem Aufsetzen des Absprungbeines ersichtlich. Aus der vertikalen Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts kann die Absenkgeschwindigkeit und der Zeitpunkt der niedrigsten Körperschwerpunktposition (bei $v_z = 0$) errechnet werden. Als Vergleichswert der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit dient in der Regel der Geschwindigkeitswert der zweiten Lichtschranke.

Die relevanten, leistungsbestimmenden Parameter, die außerdem aus den kinematischen Daten berechnet werden, sind die Absenkung des Körperschwerpunkts und die Körperschwerpunktstrajektorien über die gesamte absprungvorbereitende Phase und Absprunghase, die Schwungbeinwinkelgeschwindigkeit, die Absprungpositionsweite (takeoff distance) und die Stemmpositionsweite (touchdown distance), die Auftreffgeschwindigkeit sowie die Abfluggeschwindigkeit (über die Geschwindigkeitskomponenten des Körperschwerpunkts beim Stützbeginn, bzw. Lösen), den Abflugwinkel, den Stemm- und Rumpfwinkel beim Auftreffen, den Kniewinkel und den Kniewinkelverlauf in der Amortisationsphase.

3.2.2 Dynamometrie

Die Erfassung der Bodenreaktionskräfte erfolgte mittels einer im Absprungbrett integrierten Kraftmessplatte (Kistler Typ 9281B, 60x40cm). In einer eigens dafür gebauten Vorrichtung wurde die Kraftmessplatte auf der Höhe des Absprungbalkens im Boden eingelassen. Auf der Kraftmessplatte wurde auf eine 5mm Aluplatte ein 15mm dickes Holzbrett mit Tartanbelag aufgelegt und verschraubt. Darüber war als Absprungbalken ein Holzbrett von 20cm Länge und 40cm Breite befestigt, welches in einen Tartanbelag eingefasst war. Diese Holzkonstruktion ermöglichte es den Athleten, wie von einem normalen Weitsprungbalken abzuspringen (siehe Abb. 3.2).

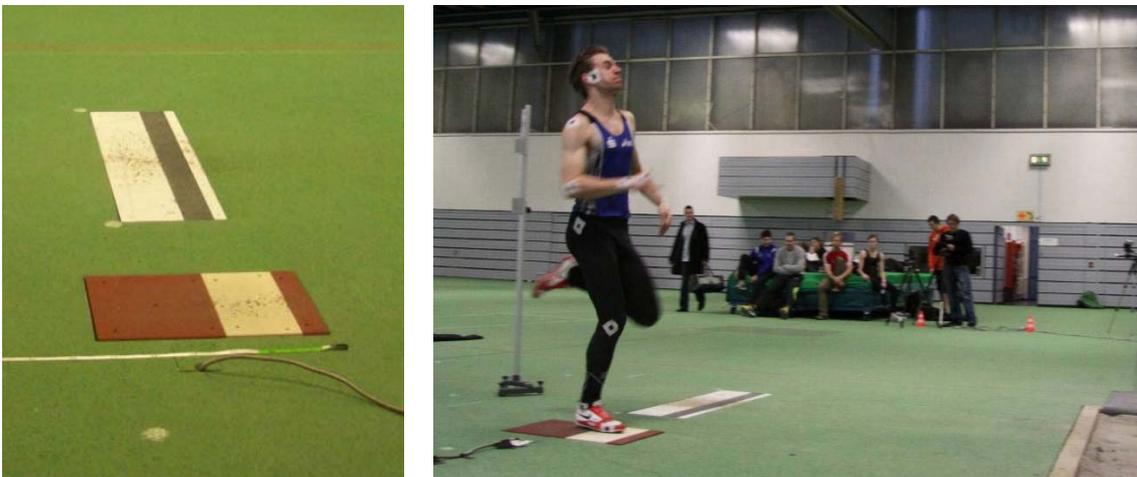


Abb. 3.2: Kraftmessplatte im Boden integriert (links), Athlet mit Markerpunkten beim Absprung (rechts).

Aus den gemessenen horizontalen und vertikalen Bodenreaktionskräften wurden Kraftstöße, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten berechnet. Die notwendigen Anfangsbedingungen für die Integration der Bodenreaktionskräfte (horizontale und vertikale Körperschwerpunktsgeschwindigkeit und -position) wurden aus den video-kinematischen Daten entnommen.

Relevante, leistungsbestimmende Parameter, die aus den dynamometrischen Daten berechnet wurden, waren der horizontale und vertikale Kraftstoß, die horizontalen und vertikalen Brems- und Beschleunigungsanteile, die Geschwindigkeitsänderungen, Stützzeit, Kraftmaxima und Kraftminima der horizontalen und vertikalen Kraftkomponente, Abfluggeschwindigkeit und Abflugwinkel.

3.2.3 Geschwindigkeitsmessung

Mit Hilfe von drei Doppellichtschranken wurden die Laufzeiten über die letzten beiden 5m-Abschnitte bis 1m vor dem Balken gemessen. Die Teilstrecken von der ersten Lichtschranke LS1: -11m bis -6m und der zweiten LS2: -6m bis -1m entsprechen dem Standardmessprotokoll der DLV-Leistungsdiagnostik. Von den Lichtschranken wurde beim Durchlaufen ein TTL-Signal ausgegeben, welches über eine AD-Messkarte aufgezeichnet wurde. Gleichzeitig wurde das Geschwindigkeitsprofil des gesamten Anlaufes mittels IR-Laser-Messung (LAVEG, Firma Jenoptik) erfasst. Für die Lasergeschwindigkeitsmessung wurde die Nullposition auf dem Absprungbalken festgelegt und kalibriert.

3.2.4 Datenverarbeitung

Bis auf die IR-Laser-Messung wurden die Messsysteme synchronisiert, indem die TTL-Signale der Lichtschranken sowie die des Videosystems gleichzeitig mit den dynamometrischen Daten über die Analog-Digital Karte eingelesen wurden.

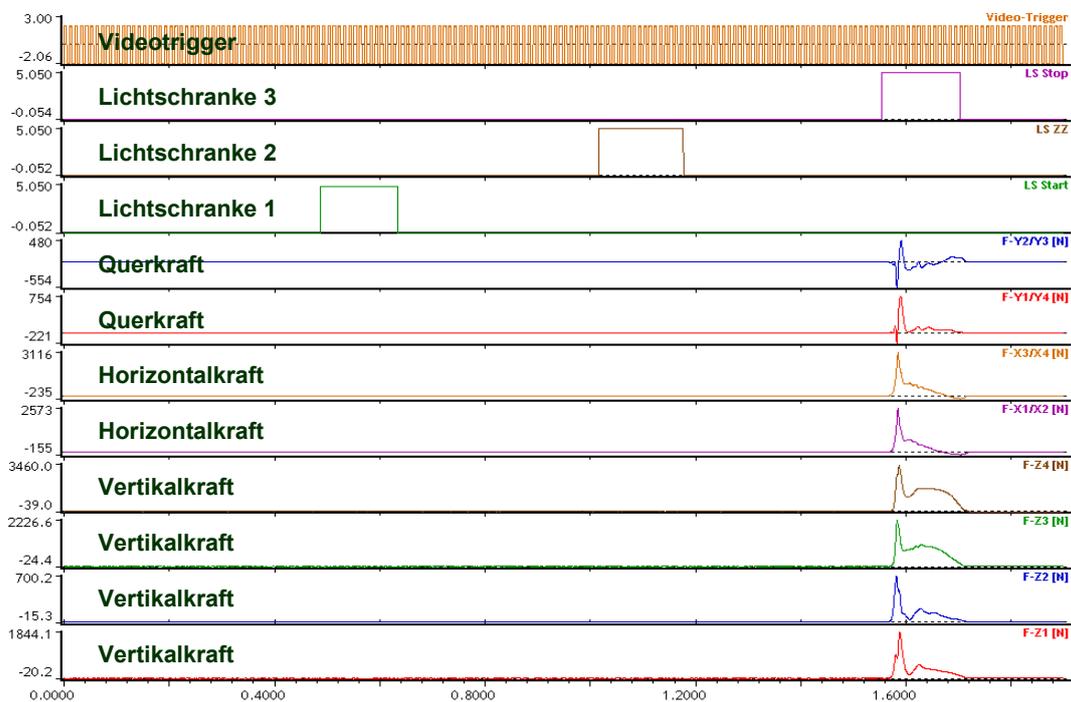


Abb. 3.3: Kanäle der analogen Messdaten (Kraftmessplatte, Lichtschrankenimpulse und Videobildtrigger, von unten).

Über einen externen Videotrigger (Bildtrigger, Abb. 3.3, oberste Zeile) wurde der Bildtakt der vier Kameras angesteuert. Die Videodaten liefen dann in den Messrechner 1 (SimiMotion-Rechner). Die analogen Ladungssignale der vier piezoelektrischen 3D-Sensoren der Kraftmessplatte wurden über den Ladungsverstärker in den Analog-Digital Wandler geschleust und die digitalen Signale von dort auf den Messrechner 2 in DIAMESS, ein eigens entwickeltes Programm (des Instituts für Sportwissenschaft der Universität Tübingen), eingelesen. Parallel wurden die drei Lichtschrankenimpulse über Funk empfangen, die TTL-Signale über den Analog-Digital Wandler zum Messrechner 2 geleitet und ebenfalls in DIAMESS verarbeitet. Unabhängig davon wurden in einem dritten Messrechner die IR-Laser-Messungen aufgenommen und gespeichert. Abb. 3.4 zeigt den Messaufbau mit den Messrechnern, Analog-Digital Wandler und dem Videotrigger.

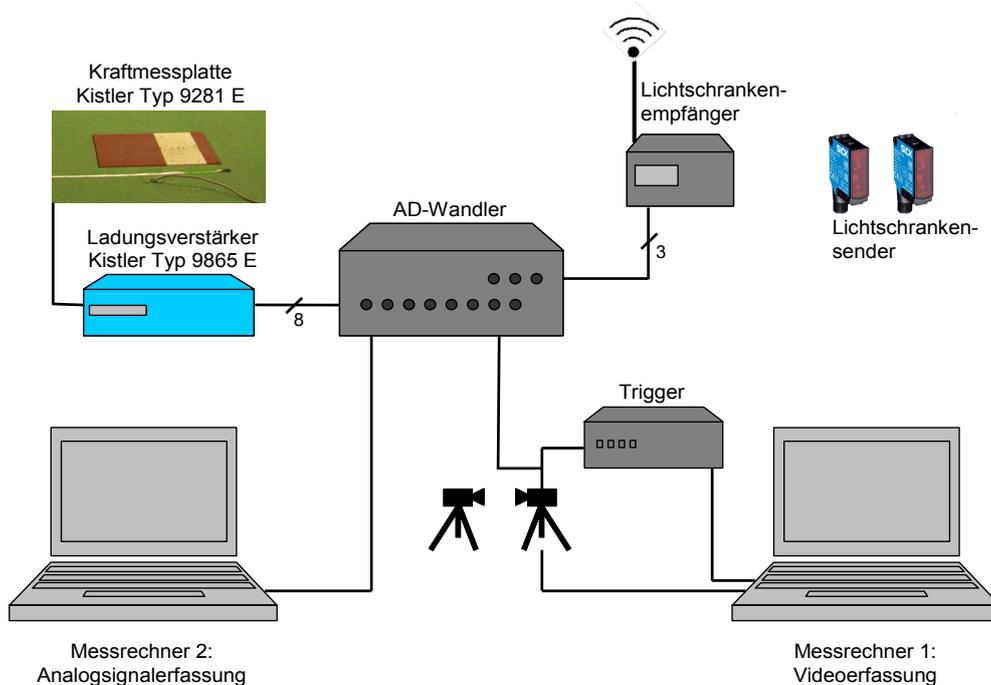


Abb. 3.4: Blockschaltbild für den Messaufbau.

Die Datenverarbeitung der Videodaten erfolgte mit SimiMotion. Auf der Grundlage zweier Kalibrierfelder über insgesamt 10m wurden die Markerpunkte für die rechte und linke Körperseite separat aufgezeichnet. Im Absprungbereich wurden dafür fünf Kalibrierstangen an vier Fixpunkten im 2m Abstand positioniert. Die beiden Bereiche überschneiden sich um 3m. Die digitalisierten Gelenkkoordinaten wurden aus SimiMotion in eine ASCII-Datei exportiert und in DIAMESS weiterverarbeitet.

Der zeitliche Verlauf der Gelenkpunkte wurde mit Hilfe einer Spline-Approximation (Reinsch, 1967) geglättet, um starke Spitzen in den mathematischen Ableitungen zu vermeiden. Hierbei wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen Nachbarmesswerte Polynomsplines dritten Grades approximiert, so dass sich über die ganze Kurve gesehen ein glatter Kurvenverlauf ergab. Die Interpolation von nicht erfassten, fehlenden Parametern erfolgte numerisch mit der Polynominterpolation.

Auf der Basis der geglätteten Marker-Verläufe erfolgte die Berechnung des Körperschwerpunktes. Mit Eingabe des Zeitpunktes des Auftreffens auf dem Absprungbalken wurden die horizontalen und vertikalen Körperschwerpunktverläufe in genauem Bezug zum Absprungszeitraum bestimmt.

Die dynamischen Daten wurden direkt in DIAMESS verarbeitet. Aus acht analogen Kanälen K_{1-8} (Querkräfte: $K_1=F_y$ 2+3, $K_2=F_y$ 1+4; Horizontalkräfte: $K_3=F_x$ 3+4, $K_4=F_x$ 1+2; Vertikalkräfte: $K_5=F_z$ 4, $K_6=F_z$ 3, $K_7=F_z$ 2, $K_8=F_z$ 1) erfolgte die Ermittlung der Bodenreaktionskräfte in alle drei Raumrichtungen (siehe Abb. 3.3).

Für die Darstellung der horizontalen und vertikalen Kraftstöße wurden die Rohdaten der Kraft-Zeit-Verläufe für Darstellungszwecke ebenfalls geglättet und mit den Videodaten verknüpft. Die Berechnung des Kraftstoßes vom Absprung erfolgt mit Eingabe der horizontalen und vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten und der, nach den Sprüngen auf der Kraftmessplatte, gemessenen Masse der Athleten.

Abb. 3.5 veranschaulicht den zeitsynchronen Verlauf der kinematischen und dynamischen Daten für jedes digitalisierte Bild. Dabei sind die Beträge der Kraftwirkungslinien der Bodenreaktionskräfte durch den Kraftangriffspunkt über die Piktogramme der Gelenkpunkte mit dem Körperschwerpunktverlauf dargestellt.

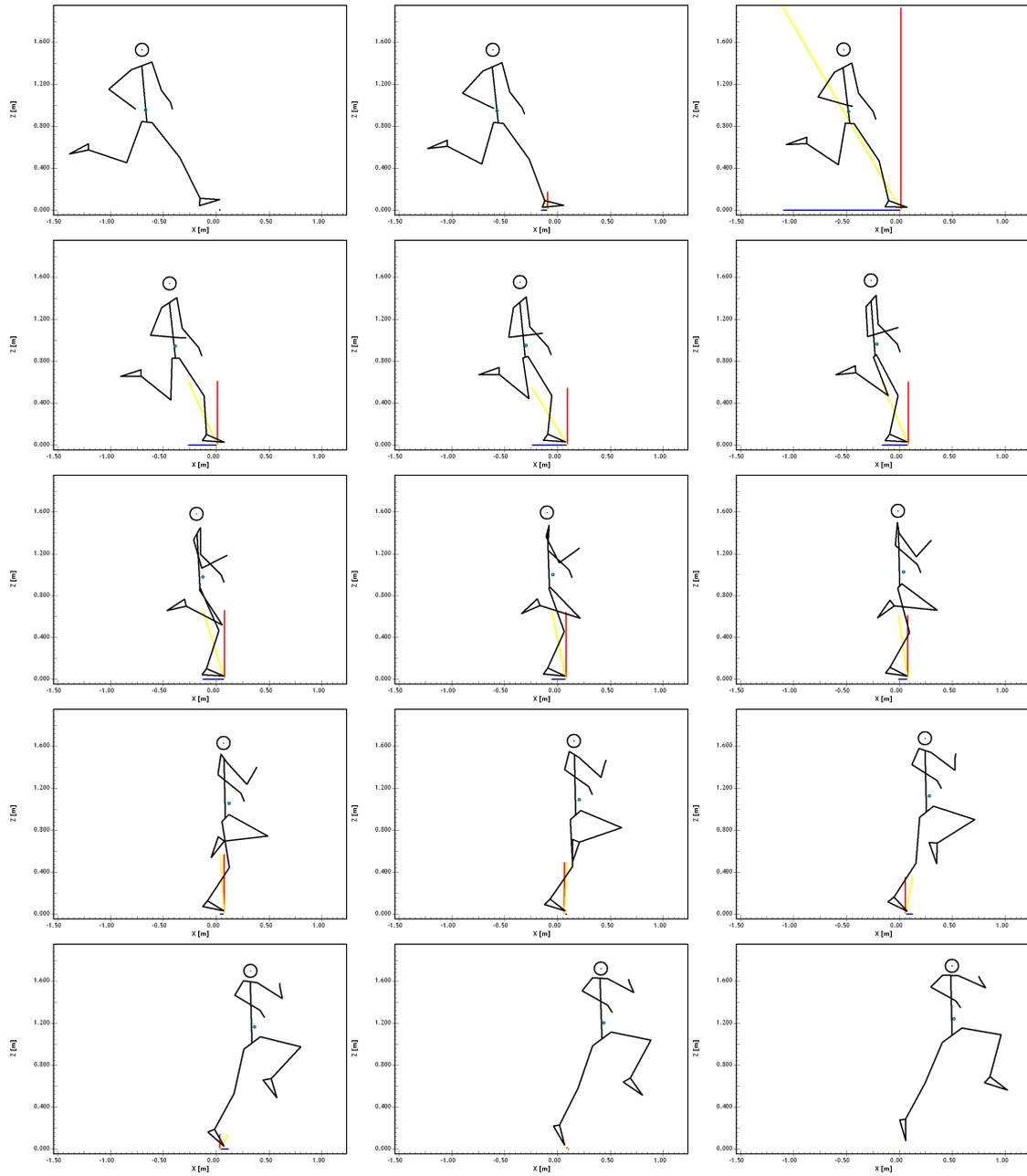


Abb. 3.5: Zeitsynchroner Verlauf der digitalisierten Gelenkpunkte und der Beträge der Kraftwirkungslinien.

3.3 Parameterberechnung und Auswerteverfahren

3.3.1 Kinematik

Körperschwerpunktberechnung

Die Körperschwerpunktberechnung kann auf der Grundlage unterschiedlicher Kalibrierengenauigkeiten und anhand verschiedener Modelle berechnet werden. Die Körperschwerpunktberechnungen in dieser Arbeit erfolgten mit dem Modell von Zatsiorsky (2002). Das Modell basiert auf einer Segmentmassenbestimmung, bei der die unterschiedlichen Dichteverhältnisse im menschlichen Körper berücksichtigt sind. Die Teilsegmente dieses Modells sind zylinderförmig und geometrisch normiert.

Das 16 Segmentmodell wurde auf ein 14 Segmentmodell übertragen, indem der Rumpf von drei Segmenten auf ein Segment reduziert wurde. Das verwendete Modell besteht aus Kopf, Rumpf, Oberschenkeln, Unterschenkeln, Füßen, Oberarmen, Unterarmen und Händen. Der Körperschwerpunkt wurde mit der analytischen Methode mit der Information der Relativmassen der Teilkörper (Massenanteile der Körperteile bezogen auf die Gesamtmasse) und der Lage der Teilkörperschwerpunkte sowie der Schwerpunktradialen nach Zatsiorsky (2002) bestimmt.

Der Vorteil der einfachen und fixen Methode zur Berechnung des Körperschwerpunkts nach Zatsiorsky (2002) ist, dass bei der Auswertung nur das Gesamtgewicht der Personen angegeben werden muss. Im Gegensatz zur individuellen Methode wird hierbei auf die Vermessung der Längen und der Umfänge der Körperteile verzichtet. Da sich die disziplinspezifische Konstitution von Weitspringern und insbesondere Weitspringerinnen bezüglich der relativen Massenverteilung der Körperteile von der durchschnittlichen Konstitution von Sportlern unterscheiden kann, ist mit kleinen Abweichungen in den Körperschwerpunktbestimmungen zu rechnen.

Körperschwerpunktstrajektorien

Aus dem Körperschwerpunktverlauf, bzw. dem Weg-Zeit-Verlauf wird durch einfaches Differenzieren der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf ermittelt. Aus dem horizontalen und vertikalen Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des Körperschwerpunkts wurden so die Anfangsgeschwindigkeiten beim Brettkontakt $v_{x,Einstieg}$ und $v_{z,Einstieg}$ entnommen (Abb. 3.7, Kreismarkierungen). Der Auftreffzeitpunkt wurde aus den Bodenreaktionskräften

aus dem ersten Anstieg in den horizontalen und vertikalen Kraft-Zeit-Verläufen, bestimmt.

Aus dem horizontalen Geschwindigkeitsverlauf des Körperschwerpunkts ist das Umsetzen der Anlauf- in die Einstiegsgeschwindigkeit sowie das Abbremsen des Körperschwerpunkts nach dem Aufsetzen des Absprungbeines ersichtlich. Aus der vertikalen Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts kann die Absenkgeschwindigkeit sowie der Zeitpunkt der niedrigsten Körperschwerpunktposition ($v_z = 0$) errechnet werden. Der tiefste Punkt des Körperschwerpunkts, der Umkehrpunkt, ist aus dem Weg-Zeit-Verlauf bei $v_z = 0$ zu entnehmen.

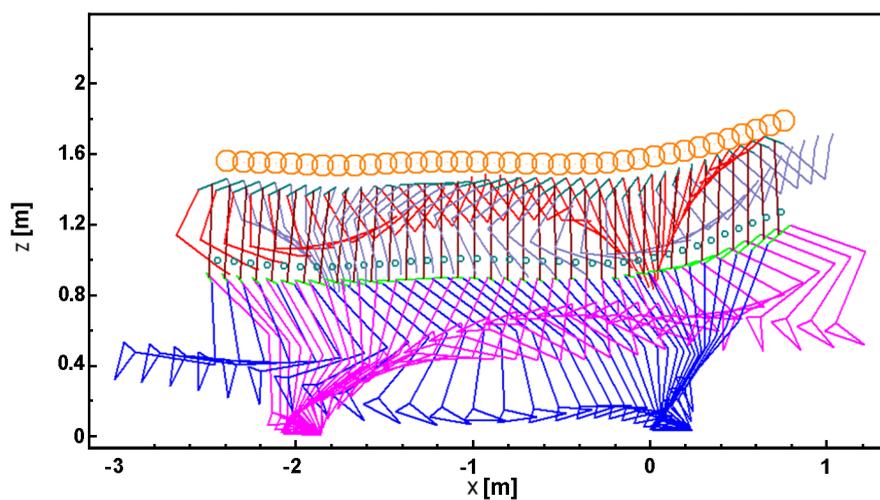


Abb. 3.6: Piktogramm mit KSP-Verlauf beim Absprung.

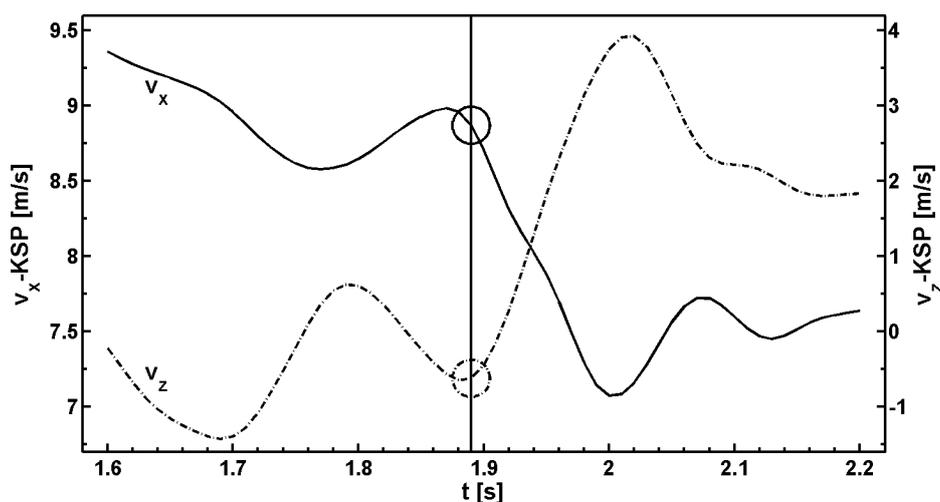


Abb. 3.7: Horizontaler und vertikaler Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des KSPs zum Zeitpunkt des Absprungs (Kreismarkierungen unten).

Positions- und Winkelbestimmung

Für alle analysierten Sprünge wurden die Absprung- und Stemmpositionsweite, der Abflugwinkel, der Stemm- und Rumpfwinkel beim Auftreffen, der Kniewinkel und der Kniewinkelverlauf in der Amortisationsphase sowie der Hüftwinkel berechnet. Abb. 3.8 veranschaulicht grafisch die berechneten Winkel und Körperpositionen mit der Berechnungsgrundlage.

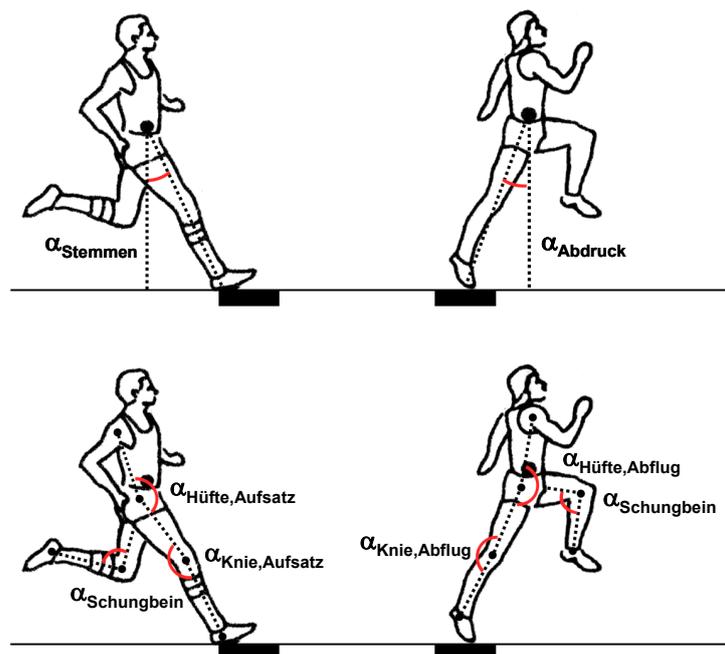


Abb. 3.8: Berechnete Winkel.

Über die Gelenkpunkte wurden die Segmentlängen für jedes aufgenommene Videobild berechnet. Daraus erfolgte dann die Winkelberechnung mit dem Cosinussatz:

$$\gamma = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot a \cdot b} \quad (1)$$

Der Stemmwinkel ergibt sich aus der Geraden von Körperschwerpunkt zur Stützstelle (Gelenkpunkt der Ferse) und der Vertikalen zum Zeitpunkt des Auftreffens. Der Rumpfwinkel wurde aus der Geraden von Körperschwerpunkt zur Stützstelle (Gelenkpunkt der Ferse) und der Geraden von Körperschwerpunkt zum Gelenkpunkt der Schulter berechnet. Für die Berechnung des Abflugwinkels wurde der Winkel zwischen der Tangente an der Körperschwerpunktkurve und der Horizontalen zum Zeitpunkt des Abfluges bestimmt. Die Winkel ist in Tab. 3.1 aufgeführt.

Tab. 3.1: Winkelberechnung, Formelzeichen und Berechnungsgrundlage.

Winkel	Formelzeichen	Berechnung über Gelenkpunkte bzw. den KSP
Stemmwinkel	α_{Stemmen}	Winkel zwischen Ferse-KSP und der Vertikalen durch den KSP beim Einstieg
Abdruckwinkel	α_{Abdruck}	Winkel zwischen Fußspitze-KSP und der Vertikalen durch den KSP beim Abflug
Stützwinkel	$\alpha_{\text{Stütz}}$	Winkel zwischen Knöchel-KSP und der Vertikalen durch den KSP von Stützbeginn bis -ende
Kraftangriffswinkel	$\alpha_{\text{Kraftangriff}}$	Winkel zwischen dem resultierenden Kraftangriffsvektor und der Vertikalen durch den KSP von Stützbeginn bis -ende
Schwungbein	$\alpha_{\text{Schwungbein}}$	Winkel zwischen Knöchel-Knie und Knie-Hüfte
Kniewinkel beim Fußaufsatz	$\alpha_{\text{Knie,Aufsatz}}$	Winkel zwischen Knöchel-Knie und Knie-Hüfte
Kniewinkel im tiefsten Punkt	$\alpha_{\text{Knie,min}}$	Winkel zwischen Knöchel-Knie und Knie-Hüfte
Kniewinkeländerung beim Beugen des Sprungbeins	$\Delta\alpha_{\text{Knie,Beugen}}$	$\alpha_{\text{Knie,Aufsatz}} - \alpha_{\text{Knie,min}}$
Kniewinkeländerung beim Strecken des Sprungbeins	$\Delta\alpha_{\text{Knie,Abdruck}}$	$\alpha_{\text{Knie,Abflug}} - \alpha_{\text{Knie,min}}$
Kniewinkel beim Abflug	$\alpha_{\text{Knie,Abflug}}$	Winkel zwischen Knöchel-Knie und Knie-Hüfte
Hüftwinkel beim Fußaufsatz	$\alpha_{\text{Hüfte,Aufsatz}}$	Winkel zwischen Knie-Hüfte und Hüfte-Schulter
Hüftwinkel im tiefsten Punkt	$\alpha_{\text{Hüfte,min}}$	Winkel zwischen Knie-Hüfte und Hüfte-Schulter
Hüftwinkel beim Abflug	$\alpha_{\text{Hüfte,Abflug}}$	Winkel zwischen Knie-Hüfte und Hüfte-Schulter
Hüftwinkeländerung	$\Delta\alpha_{\text{Hüfte}}$	$\alpha_{\text{Hüfte,Aufsatz}} - \alpha_{\text{Hüfte,min}}$
Abflugwinkel	α_{Abflug}	Winkel zwischen der Tangenten an der Körperschwerpunktbahn und der Horizontalen nach Stützende

Die berechneten Positionen und Positionsgrößen dazu sind in Tab. 3.2 dargestellt. Für die Stemmpositionsweite (Bilder links) wurden die Stemmweite w_0 und die Körperschwerpunkthöhe h_0 , für die Abflugpositionsweite (Bilder rechts) Abdruckweite x_0 (W_{Abdruck}) und die Körperschwerpunkthöhe z_0 ($H_{\text{KSP,Abflug}}$) berechnet.

Tab. 3.2: Positionsberechnung, Formelzeichen und Berechnungsgrundlage.

Positionen	Formelzeichen	Berechnung über Gelenkpunkte bzw. den KSP
Stemmpositionsweite	w_0 (W_{Stemmen})	Abstand zwischen Knöchel und der Vertikalen durch den KSP beim Einstemmen
KSP-Höhe in Stemmposition	h_0 ($H_{\text{KSP,Einstieg}}$)	Höhe des KSPs beim Einstemmen
Abflugpositionsweite	x_0 (W_{Abdruck})	Abstand zwischen Fußspitze und der Vertikalen durch den KSP beim Abflug
KSP-Höhe in Abflugposition	z_0 ($H_{\text{KSP,Abflug}}$)	Höhe des KSPs beim Abflug
Mittlerer Stütz	$t_{\alpha,\text{Stütz}}$	Position, in der KSP und Fußknöchel senkrecht übereinander liegen

Theoretische Sprungweite

Die Sprungweite kann theoretisch nicht exakt bestimmt werden, sie bleibt vielmehr eine Abschätzung, bei der Windeinfluss vernachlässigt und der Verlust bei der Landetechnik in der Regel mit einem fixen Wert eingerechnet wird. Für die Bestimmung der Flugbahn des Körperschwerpunkts wurden die Anfangshöhe des Körperschwerpunktes z_0 und die Absprunghöhe x_0 aus den Körperschwerpunktstrajektorien zum Zeitpunkt des LöSENS entnommen. Bei der Landehöhe x_L konnte nicht auf kinematische Auswertungen zurückgegriffen werden. Da jedoch davon ausgegangen werden muss, dass bei Nachwuchssportlern und vor allem bei Trainingssprüngen der Aufsetzpunkt der FüÙe bei der Landung etwas vor der Schnittstelle der theoretischen Körperschwerpunktbahn mit der Landefläche liegt, wurde für die Landehöhe x_L oder den Landeversatz ein fixer Betrag von 0.20m gewählt (siehe Wank, 2007).

Die Flugparabel setzt sich aus einer gleichförmig geradlinigen in x-Richtung und einer gleichmäÙig beschleunigten Bewegung in z-Richtung zusammen.

$$x(t) = v_{x, Abflug} \cdot t \quad (2)$$

$$z(t) = v_{z, Abflug} \cdot \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + z_0 \quad (3)$$

Durch Umformung des Gleichungssystems, Eliminieren der Zeit, und Nullsetzen von $z(t)$ kann die theoretische Sprungweite aus den Abflugparametern x_0 und dem Landeversatz x_L ermittelt werden.

$$W_{theor} = \frac{v_{Abflug}^2 \cdot \cos^2 \alpha}{g} \left(\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{2 \cdot z_0 \cdot g}{v_{Abflug}^2}} \right) + x_0 - x_L \quad (4)$$

3.3.2 Dynamik

Bodenreaktionskräfte beim Weitsprungabsprung

Aus den dynamometrischen Daten wurde der Zeitverlauf der Bodenreaktionskräfte in allen drei Raumrichtungen gemessen. Für die Berechnungen der Bodenreaktionskräfte des Weitsprungabsprungs wurde das Augenmerk auf die horizontale F_x und vertikale F_z Kraftkomponente gelegt. Sie sind leistungsbestimmend. Die Querkräfte F_y , die im Absprung wirken, wurden in den Analysen nicht aufgeführt.

Aus den horizontalen und vertikalen Bodenreaktionskräften wurden durch Integration Kraftstöße (Beschleunigungen) und Geschwindigkeitsänderungen berechnet. Für die horizontalen S_x und vertikalen S_z Kraftstöße des Weitsprungabsprungs und die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung Δv in x- und z-Richtung sind zwei dabei grundsätzliche Dinge kennzeichnend.

Der horizontale Kraftstoß S_x besteht aus dem negativen Bremsanteil $-S_x$ und dem positiven Beschleunigungsanteil $+S_x$, wobei der Bremsanteil deutlich überwiegt. Somit ist der horizontale Gesamtkraftstoß immer negativ.

In vertikaler Richtung muss die Gewichtskraft des Springers $F_g = m \cdot g$ von der Gesamtkraft F_z abgezogen werden, da sie nicht zur Geschwindigkeitsänderung des Springers beiträgt. Daraus ergeben sich bei der Integration um die Gewichtskraftlinie an den Integrationsrändern kleine, negative Flächenanteile (siehe Abb. 3.10, Beginn des Kraftstoßes, lilafarbener und Ende des Kraftstoßes, dunkelgrüner Flächenanteil).

Für die Geschwindigkeitsänderungen ergibt sich somit:

$$\Delta v_x = \frac{\int F_x dt}{m} \quad (5)$$

$$\Delta v_z = \frac{\int (F_z - F_g) dt}{m} \quad (6)$$

und für die absoluten Geschwindigkeiten mit den Einstiegsgeschwindigkeiten:

$$v_x = \frac{\int F_x dt}{m} + v_{x, \text{Einstieg}} \quad (7)$$

$$v_z = \frac{\int (F_z - F_g) dt}{m} + v_{z, \text{Einstieg}} \quad (8)$$

Als Integrationskonstanten für die Parameterberechnungen der Bodenreaktionskräfte wurden aus den kinematischen Daten die Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x, \text{Einstieg}}$ und $v_{z, \text{Einstieg}}$ aus den horizontalen und vertikalen Geschwindigkeits-Zeit-Verläufen des Körperschwerpunkts verwendet. Abb. 3.9 zeigt die Integration des Kraft-Zeit-Verlaufs.

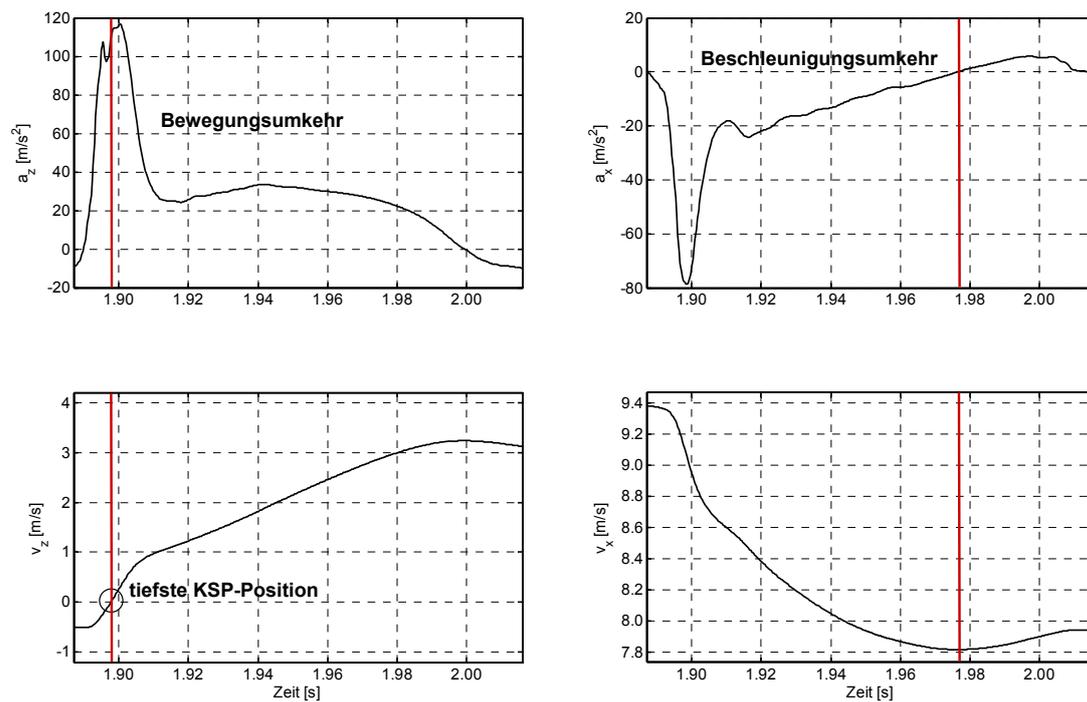


Abb. 3.9: Vertikaler (oben links) und horizontaler (oben rechts) Beschleunigungs-Zeit-Verlauf der Bodenreaktionskräfte beim Weitsprungabsprung und entsprechend vertikaler (unten links) und horizontaler (unten rechts) Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des Weitsprungabsprungs (unten).

Beim horizontalen Kraftstoß wird der Übergang von Bremsen zu Beschleunigen, die Beschleunigungsumkehr, durch den Vorzeichenwechsel der Kraft erfasst. Im vertikalen Kraftstoß bestimmt die Bewegungsumkehr den Übergang von Bremsen zu Beschleunigen. Dieser Umkehrpunkt ($v_z = 0$) ist mit der Information über die tiefste Körperschwerpunktsposition aus den Videodaten zu bestimmen. Streng genommen darf der erste Teil des vertikalen Kraftstoßes bis zur Bewegungsumkehr nicht als Bremsanteil bezeichnet werden, da die Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts über den gesamten Stützverlauf zunimmt, das heißt der Körperschwerpunkt eine positive Beschleunigung erfährt. Da jedoch die Geschwindigkeiten des Körperschwerpunkts bis zur Bewegungsumkehr wegen ihrer Richtung negativ sind, wird im Folgenden zum einfacheren Verständnis der Begriff „vertikaler Bremskraftstoß“ verwendet.

In Abb. 3.10 sind die berechneten Leistungsparameter des horizontalen und vertikalen Kraftstoßes und die Zusammenfassung der in DIAMESS automatisch berechneten Parametern dargestellt. Die exemplarische Berechnung geht auf einen Weitsprung aus dem Wettkampfanlauf mit einer Weite von 7.20m zurück.

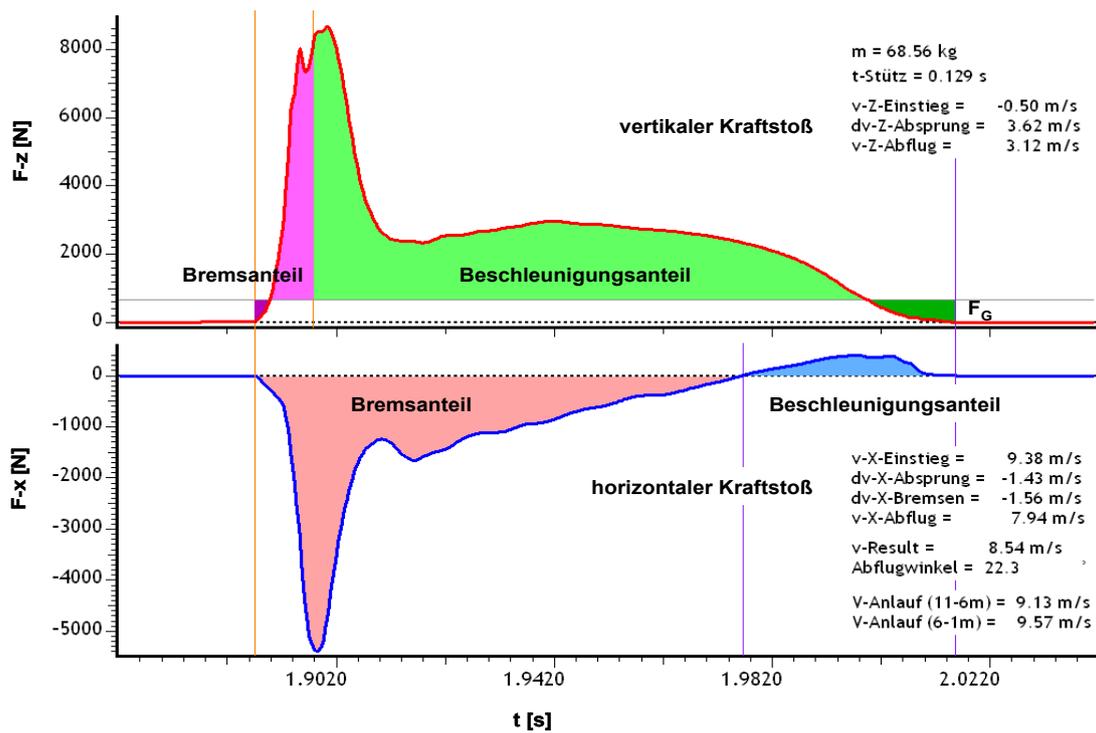


Abb. 3.10: Horizontaler (unten) und vertikaler (oben) Kraftstoß des Weitsprungabsprungs mit berechneten Leistungsparametern. Zur besseren Veranschaulichung sind die horizontalen Kraftstöße auf der Ordinatenachse größer skaliert.

Die Abfluggeschwindigkeiten $v_{x,Abflug}$ und $v_{z,Abflug}$ wurden aus dem Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf durch Integration der Bodenreaktionskräfte ermittelt. Die vertikale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{z,Absprung}$ beinhaltet den vertikalen Brems- und Beschleunigungsanteil. Bei den horizontalen Absprungparametern ist im Ergebnisausdruck neben der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x,Absprung}$ separat noch der Bremsanteil $\Delta v_{x,Bremsen}$ dargestellt.

Für die Analysen wurden auch die Beträge von Kraftminimum F_{Min} und -maximum F_{Max} bestimmt. Diese sind aus den Kraft-Zeit-Verläufen abzulesen (siehe Abb. 3.10).

3.3.3 Vergleich der 2D und 3D Kinematik

Für eine Genauigkeitsabschätzung der 2D-Videoanalyse wurde zu einem Messtermin parallel eine 3D-Videoanalyse mit sechs Kameras durchgeführt und separat ausgewertet. Die Gelenkpunkte der x- und z-Ebene wurden für die 2D- und 3D-Piktogramme in Abb. 3.11 für einen Vergleich übereinander gelegt. Minimale Abweichungen sind über den

gesamten Verlauf erkennbar. Die Abweichungen der Arme und des Schwungbeins sind dabei etwas größer als die des Sprungbeins.

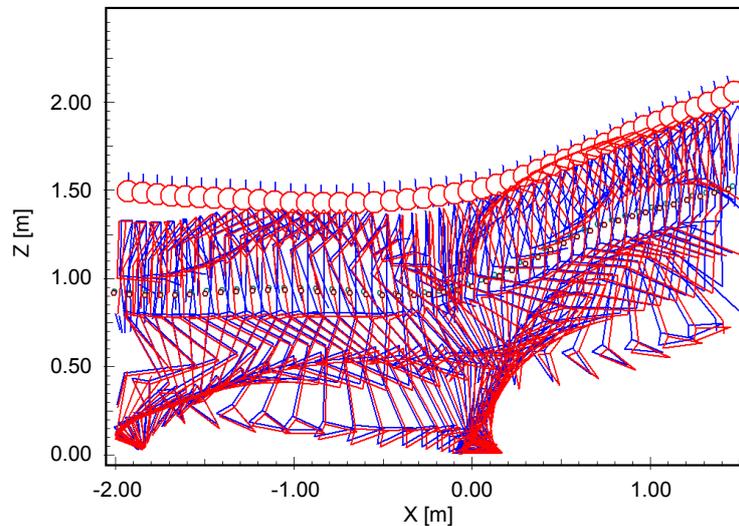


Abb. 3.11: Kinematische 2D und 3D Aufnahmen im Vergleich.

Bei der Transversalbewegung des Körperschwerpunkt während der Stützphase kann etwa mit 2cm gerechnet werden. In Ausnahmefällen können bei leicht schrägem Absprung auch etwas größere Querbewegungen des Körperschwerpunkts gemessen werden. Die Geschwindigkeiten des Körperschwerpunkts in der y-Ebene in dieser Zeit liegen etwa bei 0.15m/s.

Durch die Querbewegung des Körperschwerpunkts ergeben sich folglich auch Abweichung bei der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeit, die nur über die 2D-Auswertungen bestimmt wurden (siehe Abb. 3.12). Die Differenzen zwischen den horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten der 2D- und der 3D-Auswertungen liegen bei maximal 0.2m/s. Die vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten unterscheiden sich in den beiden Auswerteverfahren kaum.

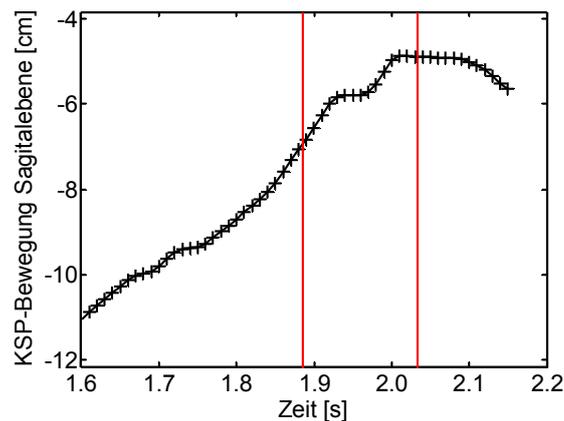


Abb. 3.12: Typischer Weg-Zeit-Verlauf eines Körperschwerpunkts in der Sagittalebene (y-Ebene) über die letzten 3 Schritte und den Stützzeit (rote Balkenarkierung) in Bezug zum Nullpunkt in der Mitte der Kraftmessplatte.

Hinsichtlich der Knieposition des Sprungbeins beim Absprung wurden Transversalbewegungen bis 3cm in eine Richtung gemessen. In der Mehrheit der Fälle ist zu sehen, dass das minimale „Ausbrechen“ des Knies bis zum äußersten Punkt, danach wieder in die entgegengesetzte Richtung zurück reguliert wird.

Der Vergleich zeigt, dass die Abweichungen im üblichen Varianzbereich der Kinematikparameter liegen. Da die Auswerteparameter hauptsächlich aus der Bewegung in der x-z-Ebene extrahiert werden und die zusätzliche minimal bessere Messgenauigkeit – für die Untersuchung des Sprungbeins – durch den Einsatz einer 3D Messung einem unverhältnismäßig sehr viel höheren Material- und Auswerteaufwand gegenüberstehen, wurde nach Sichtung der Daten und Abschätzung der Datengenauigkeit darauf verzichtet.

3.3.4 Statistische Prüfverfahren

Zunächst werden für die Beschreibung der Anlauf- und Absprungbewegung die Weitsprünge der männlichen Kaderathleten (A-, B- und C-Kader) untersucht. Bei der Untersuchung auf Unterschiede im Absprungverhalten bei gleichen Sprungweiten müssen den untersuchten Weitsprüngen etwa gleiche Anlaufgeschwindigkeiten zugrunde liegen. Für die Ergebnisse der Kapitel 4.1 bis 4.7 werden deshalb nur die Weitsprünge männlicher Kaderathleten berücksichtigt, die aus dem mittleren Anlauf die Mindestweite von 6.70m und aus dem langen Anlauf (Wettkampfanlauf) die von 6.80m erreichten. Da

die Athleten unterschiedlich oft und zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Messungen teilgenommen haben, bringen sie für diese Mindestanforderung unterschiedlich viele Sprünge in die Datenauswertung mit ein.

Um die Zusammenhänge der leistungsbestimmenden Variablen zu erklären und ihre Abhängigkeit zu begründen, wurden für die leistungsbestimmenden Variablen (für alle Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf: $n = 33$) Korrelationen nach Pearson in SPSS berechnet. Nach der Überprüfung der Voraussetzungen (Normalverteilung der Variablen) erfolgte die Prüfung der Nullhypothese: die zweiseitige Signifikanzanalyse auf dem Niveau von $p > 0.01$. Die Korrelationen und Regressionen wurden mit MATLAB grafisch dargestellt. Anhand der Ergebnisse wird im Ergebnisteil die Koinzidenz gegenüber der Kausalität der Zusammenhänge diskutiert.

Die Vergleiche der Weitspringer untereinander erfolgen deskriptiv. Die Voraussetzungen für statistische Prüfverfahren, wie beispielsweise für die multivariate Varianzanalyse, liegen für die Absprungparameter der Weitspringer nicht vor.

Für eine Nachwuchsspringerin wurde in Kapitel 4.8 eine Längsschnittstudie durchgeführt. Die berechneten Variablen sind über den Verlauf von drei Jahren dargestellt und analysiert. Hierbei wurden von elf Messterminen jeweils der beste Weitsprung aus dem mittleren und aus dem Wettkampfanlauf berücksichtigt. Die Stichprobe der aufgezeichneten und ausgewerteten Leistungsparameter lässt ebenfalls keine statistischen Prüfverfahren zu. Die Ergebnisse sind einzelfallanalytisch interpretiert.

Bei den Vergleichen der Weitsprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf in Kapitel 4.8 wurden nur die Athleten berücksichtigt, die mindestens zwei Sprünge aus beiden Anlaufdistanzen mit den oben angegebenen Mindestweiten einbringen konnten. Für die Frage, ob die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf den aktuellen Leistungsstand genauso überprüfen können wie die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf, wurde zur Prüfung der Mittelwertunterschiede (d.h. zur Überprüfung der Nullhypothese) der t-Test für unabhängige Stichproben auf dem Signifikanzniveau von $p < 0.05$ in SPSS gerechnet. Die Prüfung auf Varianzgleichheit wurde mit dem Levene-Test geprüft, die Normalverteilung mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test. Die Berechnung erfolgt auf dem Datensatz der Sprünge der fünf Weitspringer, die sowohl Weitsprünge aus dem mittleren als auch aus dem Wettkampfanlauf in die Stichprobe einbringen ($n_{WkA} = 33$, $n_{mA} = 45$).

Bei den grafischen Darstellungen und Beschreibungen sind die Athleten aus Datenschutzgründen mit bestimmten Nummern gekennzeichnet. Die Nummerierung ist für jeden einzelnen Weitspringer durchgängig gleich.

Kapitel 4

Erkenntnisse, Phänomene und theoretische Überlegungen zur Absprungphase des Weitsprungs

Um das Absprungverhalten quantitativ zu beschreiben und qualitativ zu bewerten, müssen für die betrachteten Weitsprünge möglichst gleiche Voraussetzungen vorliegen. Die Voraussetzungen betreffen zum einen die Anfangsbedingungen, und damit primär die Anlaufgeschwindigkeit, zum anderen die konditionellen Fähigkeiten (Leistungsniveau, Entwicklungsstand, motorische Kraftfähigkeiten) und konstitutionellen Eigenschaften (Masse, Körpergröße) der Athleten. Annähernd gleiche Anfangsbedingungen sind gerade dann von Bedeutung, wenn nach Unterschieden im Absprungverhalten für gleiche Sprungweiten gesucht wird und Sprünge auf individuelle Strategien hin analysiert werden sollen.

Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse werden ausschließlich die Weitsprünge, die aus dem mittleren Anlauf die Mindestweite von 6.70m und aus dem langen Anlauf (Wettkampfanlauf) die Mindestweite von 6.80m erzielten, berücksichtigt. Da Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf nicht ganzjährig gesprungen werden können, fällt sowohl die Anzahl der berücksichtigten Athleten, als auch die Gesamtanzahl der Sprünge ($n_{WkA} = 33$ im Vergleich zu $n_{mA} = 47$) in diesem Untersuchungsbereich geringer aus. Sieben Weitspringer erfüllen die Vorgaben für die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf, neun Athleten die für den mittleren Anlauf. In die Ergebnisdarstellung fließen unterschiedlich viele Sprünge der einzelnen Weitspringer ein.

Die Ergebnisse der Kapitel 4.1 bis 4.5, welche die deskriptive Beschreibung der Norm- und Vergleichswerte, Korrelationen der leistungsbestimmenden Parameter sowie theoretische Berechnungen und Effektivitätsbestimmungen beinhalten, basieren auf den Sprüngen der sieben beziehungsweise neun Weitspringer mit den genannten Mindestweiten. Tab. 4.1 gibt eine Übersicht über die Athleten.

Tab. 4.1: Datengrundlage der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA der männlichen Weitspringer.

Athlet	Sprünge aus WkA [n]	Sprünge aus mA [n]	Mess- termine [n]	Weiten beim WkA [m]	Weiten beim mA [m]	Körper- größe [m]	mittlere Segment- länge (Ober-/ Unterschenkel) [m]	Gewicht [kg]
1	12	10	6	6.80 - 7.45	6.72 - 7.00	1.82	0.44 0.42	72.3
2	8	11	5	6.75 - 7.25	6.70 - 7.00	1.80	0.42 0.41	68.1
3	2	6	3	7.25 - 7.30	6.80 - 7.15	1.97	0.54 0.46	93.0
4	2	3	2	6.85 - 7.00	6.75 - 7.05	1.93	0.49 0.45	82.4
5	6	5	3	6.85 - 7.00	6.70 - 7.80	1.83	0.47 0.44	79.7
6	2	1	1	6.90 - 7.10	6.70	1.80	0.45 0.39	77.6
7	1	5	3	6.70	6.70 - 6.90	1.80	0.50 0.45	82.0
8	–	1	1	–	6.80	1.81	0.45 0.42	78.0
9	–	5	3	–	6.70 - 7.00	1.78	0.45 0.43	70.3

Für die Gegenüberstellung der Weitsprünge aus den beiden unterschiedlichen Anlaufängen in Kapitel 4.6 werden zunächst die Ergebnisse der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf vorgestellt. Der Vergleich der leistungsbestimmenden Parameter der Weitsprünge aus den beiden Anlaufängen soll zeigen, inwieweit die Sprünge aus dem mittleren Anlauf den überprüften Leistungsstand, der aus den Sprüngen mit Wettkampfanlauf ermittelt wurde, widerspiegeln. Diese Analyse berücksichtigt nur die Weitspringer, die mindestens zwei Sprünge aus beiden Anlaufdistanzen mit den oben angegebenen Mindestweiten erreichten. Diese Bedingungen erfüllen fünf Springer. Sie sind in Tab. 4.1 als Athlet 1 bis 5 aufgeführt.

In Kapitel 4.7 wird auf der Grundlage aller Ergebnisse eine Klassifikation vorgestellt.

Der Entwicklungsverlauf einer Nachwuchsspringerin über den Zeitraum von drei Jahren wird in Kapitel 4.8 analysiert. Die Datenbasis umfasst Sprünge von elf Messterminen. Die Übersicht der Messtermine ist in Abb. 4.1 dargestellt.

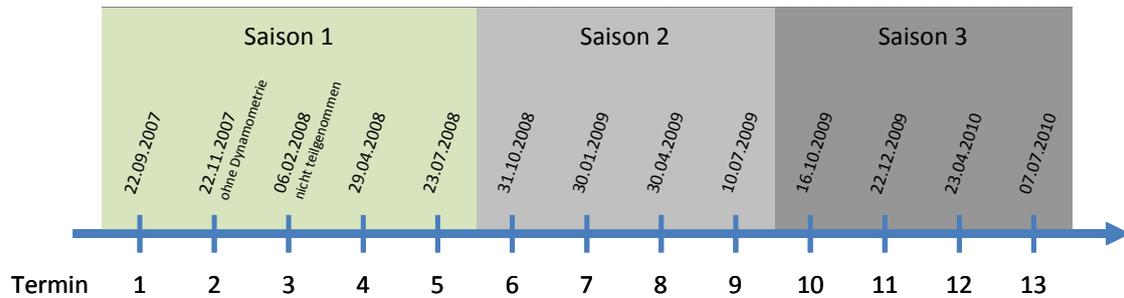


Abb. 4.1: Messzeitpunkte der Querschnittstudie einer Weitspringerin über drei Jahre.

4.1 Anlauf und Absprungvorbereitung

4.1.1 Anlaufgestaltung

Zur Analyse der Geschwindigkeitsprofile liefert die Lichtschrankenmessung über die beiden 5m-Abschnitte gemittelte Anlaufgeschwindigkeiten. Anhand der Geschwindigkeitsdifferenz von der ersten v_{LS1} (–11m bis –6m) zur zweiten v_{LS2} (–6m bis –1m) Lichtschranke lässt sich die Differenz ermitteln, die die Anlaufgestaltung auf den letzten fünf Schritten beschreibt. Die mittleren Geschwindigkeiten zeigen auf den letzten Anlaufschritten von der ersten Lichtschranke ($v_{LS1} = 9.40\text{m/s} \pm 0.27\text{m/s}$) zur zweiten ($v_{LS2} = 9.52\text{m/s} \pm 0.21\text{m/s}$) eine mittlere Geschwindigkeitszunahme von 0.11m/s . Die größte gemessene Anlaufgeschwindigkeit beträgt $v_{LS2} = 9.96\text{m/s}$ und zeigt eine Geschwindigkeitssteigerung von $v_{LS2-LS1} = 0.36\text{m/s}$ ($W = 7.10\text{m}$, Athlet 6). Auf Höhe der ersten Lichtschranke haben die Weitspringer, die bis zum Brett beschleunigen, im Mittel 95.7% ihrer Maximalgeschwindigkeit v_{LS2} erreicht.

Im interindividuellen Vergleich der Anlaufgestaltung zeigt sich bei sechs der sieben Weitspringer beim Wettkampfanlauf eine Geschwindigkeitssteigerung bis zum Brett. Ein Springer (Athlet 1) erreicht seine Höchstgeschwindigkeit systematisch im ersten Lichtschrankenintervall. Seine Geschwindigkeitsreduktion liegt im Mittel bei $v_{LS2-LS1}$

= 0.15m/s. Da dieser Springer jedoch stets größere Geschwindigkeiten bei der ersten Lichtschranke erreicht, ist er auf Höhe der zweiten Lichtschranke im Mittel ähnlich schnell wie die anderen Weitspringer (siehe Tab. 4.3, Weitspringer 1).

Abb. 4.2 und Tab. 4.2 veranschaulichen die Geschwindigkeitsdifferenzen über die Anlaufgeschwindigkeit. Die erreichte Geschwindigkeit vor dem Absprung ist auf der Abszissenachse mit v_{LS2} abgetragen. An den x-Werten kann somit abgelesen werden, welche Weitspringer über eine höhere bzw. niedrigere Maximalgeschwindigkeit im Anlauf verfügen. Während die Werte von Athlet 1 über einen großen Bereich streuen (was für die folgenden Ergebnisdarstellungen bedeutend ist), können die Athleten 2, 3, 4 und 6 bestimmten Geschwindigkeitsintervallen zugeordnet werden. Auf der Ordinatenachse sind die Geschwindigkeitszuwächse aller Weitsprunganläufe zu sehen. Außer Athlet 1 erzielen alle Weitspringer einen Geschwindigkeitsgewinn zum Absprung hin.

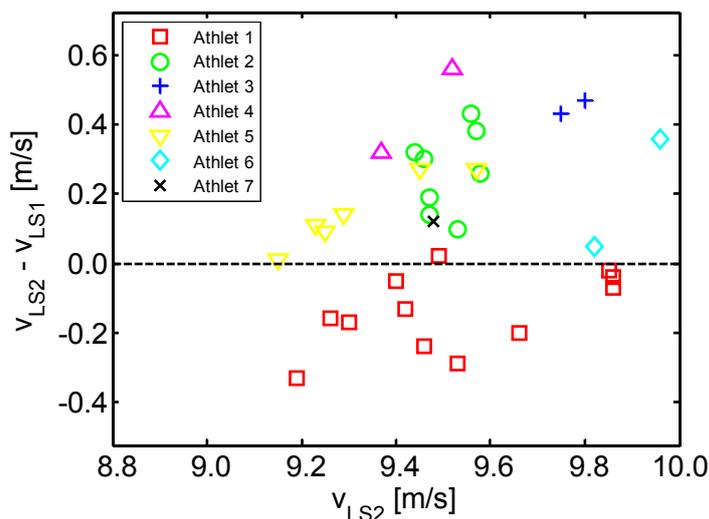


Abb. 4.2: Geschwindigkeitszuwachs $v_{Zuwachs}$ beim Wettkampfanlauf dargestellt über die Anlaufgeschwindigkeit v_{LS2} .

Unterschiede in der Anlaufgestaltung zwischen den Athleten lassen sich in zwei Kriterien feststellen. Beim Wettkampfanlauf werden mit der erreichten Anlaufgeschwindigkeit (v_{LS2}) individuelle Stärken in der Sprintfähigkeit sichtbar. Der Zeitpunkt der erreichten Maximalgeschwindigkeit ist in der Regel auf der Höhe der zweiten Lichtschranke. Typbedingt wird die Maximalgeschwindigkeit entweder auf den letzten beiden Schritten (entspricht hier v_{LS2}) oder aber bereits auf Höhe der ersten Lichtschranke (v_{LS1}) erreicht. Im zweiten Fall wird die Geschwindigkeit passiv in den Absprung hineingetragen.

Bei Weitsprüngen aus einem mittleren Anlauf zeigen sich ähnliche Geschwindigkeitsprofile. Der Geschwindigkeitszuwachs ist bei allen Athleten zum Brett hin steigend ($v_{LS1} = 8.48\text{m/s} \pm 0.28\text{m/s}$; $v_{LS2} = 8.92\text{m/s} \pm 0.20\text{m/s}$), wobei sowohl die mittlere Geschwindigkeitssteigerung von der ersten zur zweiten Lichtschranke mit $v_{LS2-LS1} = 0.44\text{m/s}$ als auch die maximal erreichte Geschwindigkeit (v_{LS2}) verdeutlichen, dass der Beschleunigungsprozess noch nicht abgeschlossen ist.

Tab. 4.2: Mittelwerte zur Anlaufgestaltung anhand der Lichtschrankenzeiten v_{LS1} , v_{LS2} sowie mittlere horizontale und vertikale Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$, $v_{z,Einstieg}$ und Abfluggeschwindigkeiten $v_{x,Abflug}$, $v_{z,Abflug}$ und Gesamtanfangs- und -abfluggeschwindigkeiten $v_{ges,Einstieg}$, $v_{ges,Abflug}$ von Sprüngen aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Geschwindigkeiten [m/s]	WkA	mA	$\Delta v_{WkA - mA}$
v_{LS1}	9.40 ± 0.27	8.48 ± 0.28	0.92
v_{LS2}	9.52 ± 0.21	8.92 ± 0.20	0.60
$v_{x,Einstieg}$	9.45 ± 0.25	8.97 ± 0.23	0.48
$v_{z,Einstieg}$	-0.65 ± 0.11	-0.60 ± 0.18	-0.05
$v_{x,Abflug}$	8.06 ± 0.24	7.70 ± 0.34	0.36
$v_{z,Abflug}$	2.84 ± 0.19	2.86 ± 0.25	-0.02
$v_{ges,Einstieg}$	9.47 ± 0.25	9.00 ± 0.24	0.47
$v_{ges,Abflug}$	8.54 ± 0.22	8.22 ± 0.26	0.32

Werden die erreichten Geschwindigkeiten aus dem mittleren und langen Anlauf der Athleten interindividuell verglichen, so zeigt sich, dass aus der Distanz des mittleren Anlaufs im Mittel 93% der Maximalgeschwindigkeit erreicht wird. Das heißt umgekehrt, dass beim mittleren Anlauf etwa 0.5m/s bis 1m/s zur Maximalgeschwindigkeit des Wettkampfanlaufs fehlen. Dies ist für die Vergleiche der Sprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf in Kapitel 4.6 relevant. Tab. 4.3 veranschaulicht die Anlaufgestaltung der Weitspringer aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf.

Der interindividuelle Vergleich zeigt auch, dass die Weitspringer, die über eine geringere Sprintschnelligkeit verfügen ($v_{max} < 9.5\text{m/s}$), beim mittleren Anlauf einen höheren prozentualen Anteil ihrer persönlichen Maximalgeschwindigkeit erreicht haben. Sie erreichen mit dem mittleren Anlauf zwischen 93% und 94% ihrer Maximalgeschwindigkeit (gemessen an der v_{LS2} des Wettkampfanlaufs). Die Springer mit besserer Sprintfähigkeit hingegen erreichen beim mittleren Anlauf zwischen 89% und 92%. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die langsameren Springer beim mittleren Anlauf, in Relation zu den schnelleren Sprintern stärker beschleunigen.

Tab. 4.3: Mittlere Anlaufgeschwindigkeiten v_{LS1} , v_{LS2} , $v_{LS2}-v_{LS1}$ des mittleren mA und des Wettkampfanlaufs WkA sowie die Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$ und die Differenz von Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg}$ und Lichtschrankenzeit v_{LS2} als abgeschätzte Fehlergröße.

Athlet	WkA: v_{LS1} [m/s]	WkA: v_{LS2} [m/s]	WkA: $v_{LS2}-v_{LS1}$ [m/s]	mA: v_{LS1} [m/s]	mA: v_{LS2} [m/s]	mA: $v_{LS2}-v_{LS1}$ [m/s]	WkA: $v_{x,Einstieg}$ [m/s]	WkA: $v_{x,Einstieg}-v_{LS2}$ [m/s]
1	9.66 ± 0.20	9.52 ± 0.24	-0.14 ± 0.11	8.46 ± 0.15	8.80 ± 0.17	0.34 ± 0.12	9.65 ± 0.22	0.13
2	9.25 ± 0.11	9.51 ± 0.06	0.27 ± 0.12	8.34 ± 0.43	8.81 ± 0.22	0.48 ± 0.24	9.33 ± 0.09	-0.18
3	9.33 ± 0.01	9.78 ± 0.04	0.45 ± 0.03	8.55 ± 0.17	8.99 ± 0.10	0.44 ± 0.21	9.60 ± 0.06	-0.18
4	9.01 ± 0.06	9.45 ± 0.11	0.44 ± 0.17	8.53 ± 0.31	9.02 ± 0.05	0.48 ± 0.28	9.21 ± 0.08	-0.24
5	9.18 ± 0.06	9.32 ± 0.16	0.15 ± 0.10	8.40 ± 0.14	8.85 ± 0.06	0.45 ± 0.14	9.17 ± 0.07	-0.15
6	9.69 ± 0.12	9.89 ± 0.10	0.21 ± 0.22	8.20	8.77	0.57	9.66 ± 0.05	-0.23
7	9.36	9.48	0.12	8.72 ± 0.13	9.13 ± 0.08	0.40 ± 0.14	9.49	0.01
8	–	–	–	8.17	9.18	1.01	–	–
9	–	–	–	8.64 ± 0.15	9.10 ± 0.19	0.45 ± 0.14	–	–

4.1.2 Anfangsgeschwindigkeit beim Brettkontakt

Die tatsächlichen Anfangsgeschwindigkeiten für den Absprung werden präziser über die kinematischen Daten aus der Videoanalyse erfasst. Mit der Berechnung der horizontalen und vertikalen Anfangsgeschwindigkeit des Körperschwerpunkts beim Fußaufsatz können dann der Verlust der Horizontalgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg} - v_{x,Abflug}$ und der vertikale Zugewinn $v_{z,Einstieg} - v_{z,Abflug}$ bestimmt werden. Die Anfangsgeschwindigkeiten aus dem Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf des Körperschwerpunkts $v_{x,Einstieg}$ und $v_{z,Einstieg}$ sind in Abb. 4.3 dargestellt.

Die mittlere Gesamtanfangsgeschwindigkeit bei Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf ($v_{ges,Einstieg} = 9.47\text{m/s} \pm 0.25\text{m/s}$) setzt sich aus einer mittleren vertikalen Anfangsgeschwindigkeit von $v_{z,Einstieg} = -0.65\text{m/s} \pm 0.11\text{m/s}$ und der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit von $v_{x,Einstieg} = 9.45\text{m/s} \pm 0.25\text{m/s}$ zusammen. Die vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten $v_{z,Einstieg}$ sind aufgrund ihrer Richtung negativ. Da der Körperschwerpunkt über den Zeitraum des Absenkens auf den letzten Schritten verhältnismäßig wenig Weg nach unten zurücklegt und außerdem in Folge nur wenig

weiter absenkt wird, ist der Betrag der Vertikalgeschwindigkeit sehr gering, jedoch nicht vernachlässigbar. Die Werte streuen im Bereich von $v_{z,Einstieg} = -0.83\text{m/s}$ bis -0.38m/s .

Die Differenzen für die vertikale Anfangsgeschwindigkeit scheinen zunächst sehr gering. Beim Vergleich der einzelnen Athleten tritt jedoch trotz der geringen Werte ein individuell typischer Streubereich auf (Abb. 4.3). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Weitspringer das Brett mit unterschiedlichen horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten erreichen. Athlet 1, 3 und 6 erreichen Anfangsgeschwindigkeiten von über 9.5m/s . In vertikaler Richtung zeigen zwei Weitspringer (Athlet 1 und 5) größere vertikale Anfangsgeschwindigkeiten.

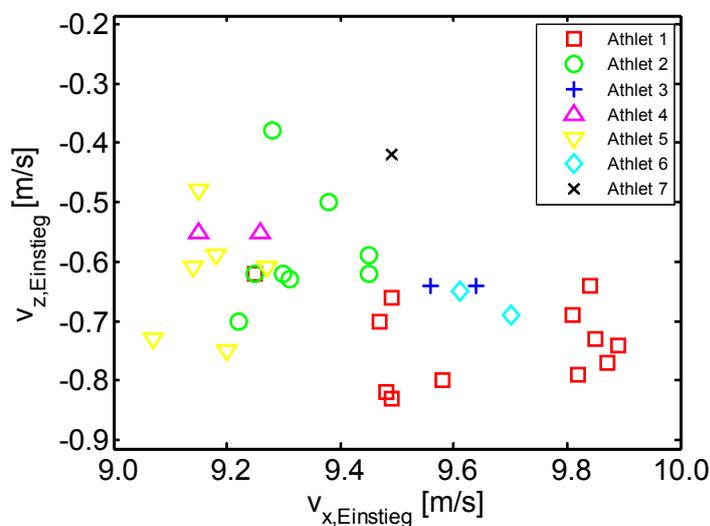


Abb. 4.3: Vertikale $v_{z,Einstieg}$ über horizontale $v_{x,Einstieg}$ Anfangsgeschwindigkeit der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Die Bedeutung der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit für das Absprungverhalten sollte dennoch nicht unterschätzt werden. Große vertikale Anfangsgeschwindigkeiten können sich beispielsweise durch spätes oder ein tieferes Absenken des Körperschwerpunkts ergeben.

Um die Differenzen der horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten aus dem Körperschwerpunktsverlauf $v_{x,Einstieg}$ und den Lichtschrankenzeiten v_{LS2} – auch für die Vergleichsmöglichkeit mit anderen Studien – quantifizierbar zu machen, wurde für die einzelnen Sprünge die jeweilige Abweichung berechnet. In 60% der Fälle sind die horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten aus dem Körperschwerpunktsverlauf etwas größer als die aus dem letzten Lichtschrankenintervall. Für die zweite Lichtschrankenzeit und die horizontale Anfangsgeschwindigkeit kann beim Wettkampfanlauf eine Differenz von $v_{LS2} - v_{x,Einstieg} = 0.06\text{m/s} \pm 0.19\text{m/s}$ errechnet werden.

4.2 Absprungbewegung

Die Analyse der Absprungbewegung anhand der kinematischen Parameter beinhaltet vor allem vier Aspekte: die Position beim Auftreffen des Sprungbeins auf das Absprungbrett, die Winkeländerungen des Kniegelenks und der Hüfte während des Absprungs, der Verlauf der Kraftangriffs- und Stützwinkel und die Abflugposition.

Für die Analyse der dynamischen Parameter der Umlenkbewegung sind die horizontalen und vertikalen Kraftstöße und die sich daraus ableitenden Geschwindigkeitsänderungen – unterteilt in die Brems- und Beschleunigungsanteile – sowie die resultierenden Abflugparameter wie die Abfluggeschwindigkeit bzw. der Abflugwinkel leistungsdiagnostisch relevant. Ein entscheidendes Kriterium für die Umlenkbewegung ist das Verhältnis von horizontalem Geschwindigkeitsverlust zu vertikalem Geschwindigkeitsgewinn. Hierbei stellt sich die Frage, mit welchem Umlenkverhalten ein optimales Verhältnis erreicht werden kann.

Im Folgenden werden grundsätzliche Sachverhalte und Phänomene der Absprungbewegung erklärt sowie Norm- und Vergleichswerte für Sprünge aus dem Wettkampfanlauf von männlichen Athleten der beschriebenen Leistungsklasse vorgestellt.

4.2.1 Stemmposition und Winkelverläufe des Sprungbeins in der Umlenkbewegung des Absprung

Über die Kniegelenkpositionen des Sprungbeins und die Winkeländerungen im Knie-, Hüft- und Fußgelenk ist der Charakter der Umlenkbewegung sowie auch in Teilen die Effizienz der Absprungbewegung quantifizierbar und bewertbar.

Die Anfangsposition wird über den Stemmwinkel, berechnet aus der Stemmweite und der Körperschwerpunktshöhe, beschrieben. Da die Stemmweite und die Körperschwerpunktshöhe von der Körpergröße abhängig sind, müssten sie für interindividuelle Vergleiche auf die Körpergröße relativiert werden. Der Stemmwinkel beschreibt unabhängig von der Körpergröße die Einstemmposition. Je größer dieser – bei gleichem Kniewinkel – ist, desto größer ist die Länge des Stemmschrittes (die Stemmpositionsweite) und desto tiefer ist der Körperschwerpunkt abgesenkt. Die Stemmpositionsweite kann zusätzlich durch ein gestreckteres Sprungbein verlängert werden.

Die Analyse der Bewegung des Sprungbeins ab dem Zeitpunkt des Auftreffens beruht maßgeblich auf zwei Kriterien: Zum einen ist die Beugung des Knies über den

Stützverlauf zu beobachten. Dabei liegt der Fokus auf der Kniewinkeländerung und dem vertikalen Weg des Körperschwerpunkts. Entscheidend ist nach dem Nachgeben, inwieweit der Kniewinkel aus der gebeugten Position gestreckt und somit der Körperschwerpunkt – mit Unterstützung der Streckbewegung des Fuß- und Hüftgelenks – vertikal beschleunigt wird. Zum anderen muss analysiert werden, wie der Springer das Hebeln über die Stützstelle realisiert, das heißt wie der Körperschwerpunkt um die Stützstelle rotiert. Tab. 4.4 beinhaltet die leistungsbestimmenden kinematischen Parameter der Absprungphase für die Weitsprünge der sieben Athleten aus dem Wettkampfanlauf, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Tab. 4.4: Mittelwerte (oberste Zeile), Minimal- und Maximalwerte der Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$, der Kniewinkel beim Aufsatz $\alpha_{Knie,Aufsatz}$, der kleinsten Kniewinkel $\alpha_{Knie,min}$, der Kniewinkel beim Abflug $\alpha_{Knie,Abdruck}$ sowie der Kniewinkeländerung beim Beugen $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ und beim Strecken $\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$ des Sprungbeins der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Athlet	$\alpha_{Stemmen}$ [°]	$\alpha_{Knie,Aufsatz}$ [°]	$\alpha_{Knie,min}$ [°]	$\alpha_{Knie,Abdruck}$ [°]	$\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ [°]	$\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$ [°]
1	29.3 ±1.5 min: 27.8 max: 32.5	166.6 ±2.1 min: 164.0 max: 171.8	130.9 ±6.7 min: 123.2 max: 140.1	170.3 ±3.0 min: 165.4 max: 175.4	35.7 ±6.6 min: 25.4 max: 43.8	39.5 ±4.5 min: 33.0 max: 46.4
2	24.7 ±1.8 min: 21.0 max: 26.4	163.4 ±2.3 min: 165.8 max: 158.5	133.7 ±4.6 min: 125.2 max: 139.7	170.1 ±4.7 min: 160.0 max: 175.1	29.7 ±5.0 min: 23.6 max: 37.4	36.4 ±2.1 min: 33.9 max: 39.8
3	28.0 ±1.0 min: 26.2 max: 28.0	169.6 ±0.9 min: 168.9 max: 170.2	135.0 ±1.5 min: 134.0 max: 136.1	171.6 ±3.2 min: 169.3 max: 173.8	34.5 ±0.6 min: 34.1 max: 34.9	36.5 ±1.7 min: 35.3 max: 37.8
4	27.1 ±1.3 min: 26.2 max: 28.0	175.4 ±0.3 min: 156.2 max: 156.6	132.3 ±0.6 min: 131.8 max: 132.7	172.1 ±2.6 min: 170.2 max: 173.9	33.1 ±0.3 min: 32.9 max: 33.4	39.8 ±2.0 min: 38.4 max: 41.2
5	27.1 ±3.8 min: 23.9 max: 34.4	162.0 ±2.4 min: 157.9 max: 164.1	133.3 ±6.6 min: 123.8 max: 141.0	170.9 ±3.9 min: 165.6 max: 176.0	28.7 ±4.9 min: 23.1 max: 34.1	37.6 ±3.3 min: 41.8 max: 33.9
6	25.1 ±3.9 min: 22.4 max: 27.9	172.1 ±0.3 min: 171.9 max: 172.3	141.6 ±0.1 min: 141.5 max: 141.6	174.9 ±1.7 min: 173.7 max: 176.2	30.5 ±0.4 min: 30.2 max: 30.8	33.4 ±1.9 min: 32.0 max: 34.7
7	24.1 –	159.3 –	130.6 –	186.7 –	28.7 –	38.2 –
M	27.1 ±2.8	165.2 ±3.5	133.0 ±5.8	170.8 ±3.5	32.2 ±5.8	37.8 ±3.6

Für den Stemmwinkel errechnet sich ein Mittelwert von $\alpha_{Stemmen} = 27.1^\circ \pm 2.8^\circ$. Die Winkel $\alpha_{Stemmen}$ streuen zwischen 34.4° und 21.0° . Das Sprungbein wird mit einer Streckung im Kniegelenk mit $\alpha_{Knie,Aufsatz}$ zwischen 157.9° und 171.8° aufgesetzt. Das sind im Mittel $\alpha_{Knie,Aufsatz} = 165.2^\circ \pm 3.5^\circ$. Der kleinste Kniewinkel $\alpha_{Knie,min}$ wird mit 123.2° , der größte mit 141.6° erreicht. Der Mittelwert liegt hier bei $\alpha_{Knie,min} = 133.0^\circ \pm 5.8^\circ$. Bei der Streckbewegung des Sprungbeins zum Zeitpunkt des Lösens vom Brett kommt es nicht bis zur vollständigen Kniestreckung. Das Lösen vom Brett erfolgt mit Kniewinkeln $\alpha_{Knie,Abdruck}$ im Bereich von 160.0° bis 176.2° . Durchschnittlich wird das Brett mit $\alpha_{Knie,Abdruck} = 170.8^\circ \pm 3.5^\circ$ Kniestreckung verlassen.

Während des Absprungs beugt sich das Knie vom Aufsatz zum tiefsten Punkt im Mittel um $\Delta\alpha_{Knie,Beugen} = 32.2^\circ \pm 5.8^\circ$. Die Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ streut zwischen minimal 23.1° und maximal 43.8° . Der kleinste Winkel wird, bei einer durchschnittlichen Stützzeit von $t_{Stütz} = 0.134s \pm 0.009s$ bei $t_{Knie,min} = 0.068s$ erreicht, also nach etwa der Hälfte der Stützzeit. Das Nachgeben im Kniegelenk benötigt durchschnittlich in etwa die selbe Zeit wie das Strecken des Sprungbeines, wobei die mittlere Kniewinkeländerung für das Strecken bei $\Delta\alpha_{Knie,Abdruck} = 37.8^\circ \pm 3.6^\circ$ liegt. In den beobachteten Fällen ist die Winkeländerung im Knie beim Strecken ($\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$) ausgeprägter als die bei der Beugebewegung ($\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$). Das kommt daher, dass der Kniewinkel in der Anfangsbedingung meist kleiner ist als beim Abflug.

Auch im Hüftwinkel zeigt sich bei der Umlenkbewegung ein Nachgeben. Die Winkelbestimmung ist aufgrund der Oberkörper- und Schulterbewegung in dieser Phase jedoch ungenau. Der Einfluss der Verwindung des Oberkörpers ist auch im Piktogramm in Abb. 4.5 zu sehen. Die Hüftwinkeländerungen können somit nur als Tendenz betrachtet werden, weshalb hier nicht weiter auf sie eingegangen wird.

Für eine effiziente Gestaltung des Stemmschrittes und somit des Stemmwinkels gibt es im Prinzip drei Strategien (siehe Abb. 4.4): Wird das Sprungbein weit vor den Körper gesetzt und gestreckt, ergeben sich die großen Winkel (Abb. 4.4 rechts oben). Bleibt die Körperschwerpunkthöhe gleich und wird dabei im Knie mehr gebeugt, fallen die Stemmwinkel kleiner aus (Abb. 4.4 links unten). Ist die Körperschwerpunkthöhe zudem stark abgesenkt und setzt der Fuß dichter unter dem Körperschwerpunkt auf, werden die kleinsten Stemmwinkel erreicht (Abb. 4.4 rechts unten).

Die auftretenden Kombinationen des Stemmwinkels und des Kniewinkels wurden grafisch differenziert. Die Einteilung in die drei effektiven Möglichkeiten unterliegt dabei einer subjektiven Einschätzung auf der Grundlage der vorliegenden Mittelwerte der

Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf und denen aus dem mittleren Anlauf (siehe Abb. 4.28). Die Einteilung ist dabei nicht als fixe Abgrenzung zu verstehen. Vielmehr sollen die entstehenden Bereiche als eine tendenzielle Beschreibung der Stemmposition verstanden werden. Die Weitsprünge der sieben Athleten können somit der oben beschriebenen Tendenz der Anfangsposition in Bezug auf die Parameter zugeordnet werden.

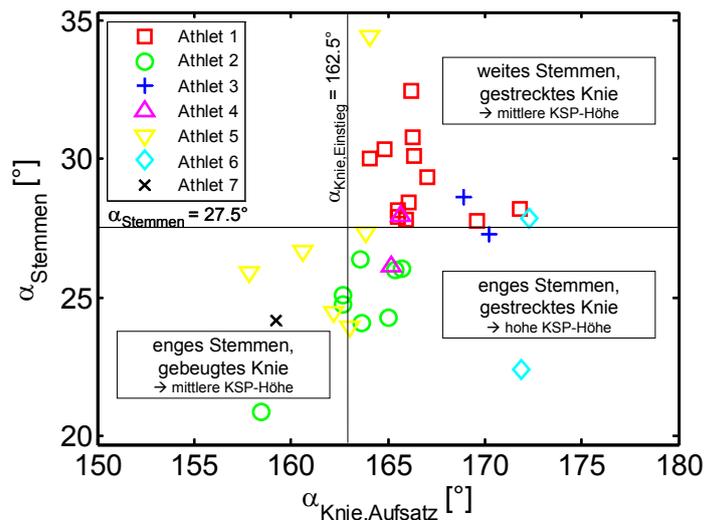


Abb. 4.4: Verhältnisse von Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$ und Kniewinkel beim Einstieg $\alpha_{Knie,Aufsatz}$ der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Es ist erkennbar, dass die einzelnen Sprünge der Athleten jeweils bestimmte Bereiche reproduzieren, also eine typische, individuelle Kombination aus Stemmwinkel und kleinstem Kniewinkel für das Sprungbein beim Aufsatz messbar ist. Aus den drei Strategien der Stemmposition können unterschiedliche Umlenkbewegungen realisiert werden.

Die Sprünge mit einem gestreckten Sprungbein, aber weitem Stemmen mit hoher Körperschwerpunktlage (im oberen Bereich rechts) ermöglichen einerseits ein (aufgrund der großen Stemmwinkel) eher uneffektives Hebeln über das Sprungbein, andererseits kann über mehr Beuge-Streckbewegung umgelenkt werden. Bei kleinerem Stemmwinkel mit größerer Kniestreckung bei höherer Körperschwerpunktposition (unterer Bereich rechts) sind gute Voraussetzungen für ein Hebeln über das gestreckte Sprungbein gegeben. Durch die Sprungbeinbeugung und die tiefere Körperschwerpunktpositionen beim Auftreffen (unterer Bereich links) können durch eine direkt initiierte Streck-

Bewegung des Sprungbeins oder durch ein „steif machen“ des Sprungbeins effektive Absprungbewegungen erfolgen.

Um die interindividuellen Unterschiede der Umlenkbewegung aus annähernd gleicher Stemmposition zu verdeutlichen, veranschaulicht Abb. 4.5 das Absprungverhalten von zwei ausgewählten Sprüngen mit einer effektiven Sprungweite von $W = 7.25\text{m}$ aus dem Wettkampfanlauf (blaues Piktogramm: Athlet 1, hellblaues: Athlet 2). Die Piktogramme sind über die Fersenposition übereinander gelegt und stellen den Fußaufsatz auf dem Brett (links), die Position des kleinsten Kniewinkels (Mitte) und die Absprungposition unmittelbar nach dem Lösen (rechts) dar. Tab. 4.5 fasst die relevanten Absprungparameter der beiden Springer zusammen.

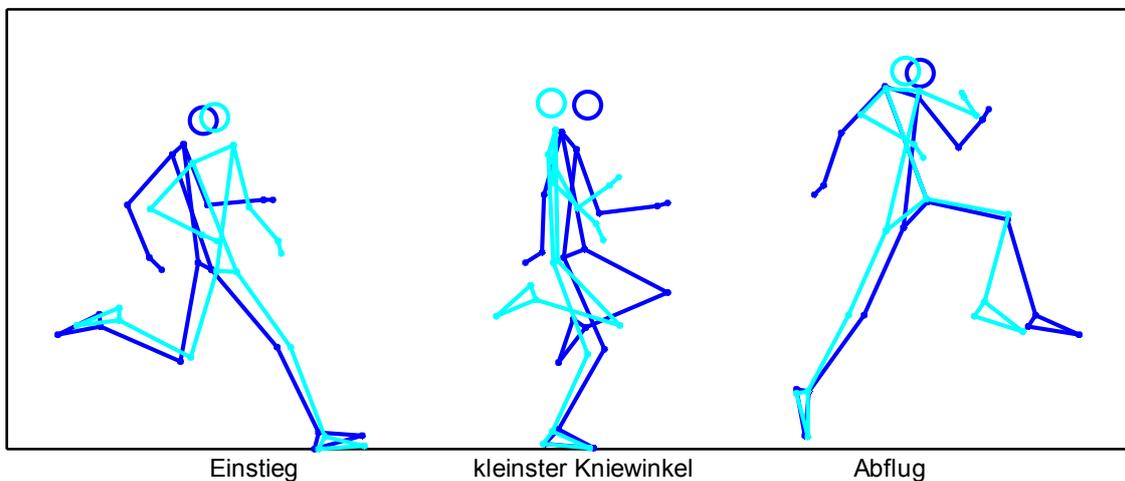


Abb. 4.5: Piktogramme der Einstiegspeditionen, der Positionen mit dem kleinsten Kniewinkel und der Abflugpositionen im Absprung zweier Weitspringer mit einer Sprungweite $W = 7.25\text{m}$ bei Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf (Athlet 1: blau und Athlet 2: hellblau).

Tab. 4.5: Kinematische Absprungparameter der beiden Weitspringer mit einer Sprungweite $W = 7.25\text{m}$.

Athlet	α_{Stemmen} [°]	$\alpha_{\text{Knie,Aufsatz}}$ [°]	$\alpha_{\text{Knie,min}}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{Knie,Beugen}}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{Knie,Abflug}}$ [°]	$\alpha_{\text{Knie,Abflug}}$ [°]
1	27.8	166.0	127.0	38.9	168.0	41.0
2	26.0	165.4	135.3	30.1	175.1	39.8

Deutlich zu erkennen sind die gleich großen Kniewinkel $\alpha_{\text{Knie,Aufsatz}}$ (Athlet 1: 166.0° , Athlet 2: 165.3°) beim Einstieg und die gering abweichenden Stemmwinkel α_{Stemmen} (Athlet 1: 27.8° , Athlet 2: 26.0°). Die Rumpffposition ist bei Athlet 2 leicht verwungen und hat weniger Rücklage als bei Athlet 1. In der Position ihrer größten Beugung weisen die Kniewinkel $\alpha_{\text{Knie,min}}$ beider Springer eine Differenz von 8.3° auf (Athlet 1: 127.0° ,

Athlet 2: 135.3°). Zudem ist das Schwungbein von Athlet 1 zum Zeitpunkt des kleinsten Kniewinkels bereits höher und sein Sprungbein ist weiter in horizontaler Richtung verschoben. Die Position des Schwungbeins erklärt den Unterschied im minimalen Hüftwinkel (Athlet 1: 145.1° , Athlet 2: 162.4°) in der Beugephase. Der Zeitpunkt des minimalen Hüftwinkels ist im Bild nicht zu sehen, da die Zeitpunkte des kleinsten Kniewinkels und des kleinsten Hüftwinkels nicht zeitgleich erreicht werden. In der Abflugposition sind ebenfalls Unterschiede in der Streckung des Abdruckbeines $\alpha_{Knie,Abdruck}$ sichtbar (Athlet 1: 168.0° , Athlet 2: 175.1°).

4.2.2 Gelenktrajektorien des Sprungbeins

Die Bewegung des Sprungbeins kann nicht nur als Beuge- und Streckbewegung betrachtet werden, sie wird außerdem von der horizontalen Hebelbewegung des Sprungbeins überlagert. Das bedeutet, dass das Sprungbein während des Beugens oder Nachgebens im Kniegelenk um die Stützstelle rotiert. Sowohl für die vertikale als auch für die horizontale Bewegung erfolgen aufgrund unterschiedlicher Anfangsbedingungen verschiedene Umlenkbewegungen. Rein mechanisch betrachtet ergeben sich auch für unterschiedliche Körpergrößen und -massen unterschiedlich effiziente Absprungbewegungen. Je nachdem, wie die konstitutionellen Voraussetzungen der Weitspringer sind, also die Kraftverhältnisse im Sprungbein und Rumpf, kann demnach im Verlauf des Knies und der Hüfte über den Stütz ein typischer Wegverlauf der beiden Gelenkpunkte beschrieben werden.

Um zunächst die prinzipiellen zeitlichen Bewegungsabläufe im Absprung zu erklären, wurde in Abb. 4.6 exemplarisch der Kniepositionsverlauf für drei Sprünge der Athleten 1, 2 und 3 dargestellt. Der Nullpunkt kennzeichnet die Stützstelle (Fußaufsatz). Das heißt, die drei Kurven sind über die Knöchelposition beim Einstieg relativ übereinander gelegt, um eine bessere Vergleichbarkeit des Verlaufs herzustellen. Startpunkt und Endpunkt der Linien stellen Einstieg und Lösen des Absprungs dar. Die Körpergröße und die Segment- bzw. Beinlänge von Ober- und Unterschenkel der Athleten sind nicht identisch (siehe Tab. 4.1). Der Unterschied ist bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Prinzipiell ist in den Kurven des Kniepositionsverlaufs (Abb. 4.6 oben) nach dem Einstieg zunächst ein Absenken sichtbar. Die Abwärtsbewegung des Knies beträgt etwa 3cm für 10cm Weg. Dafür werden etwa 0.03s benötigt. In dieser Zeitspanne nach dem Auftreffen des Sprungbeines sind die größten Kniewinkeländerungen messbar. (Abb. 4.6 unten). Die Kniebeugung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ beträgt etwa 25° .

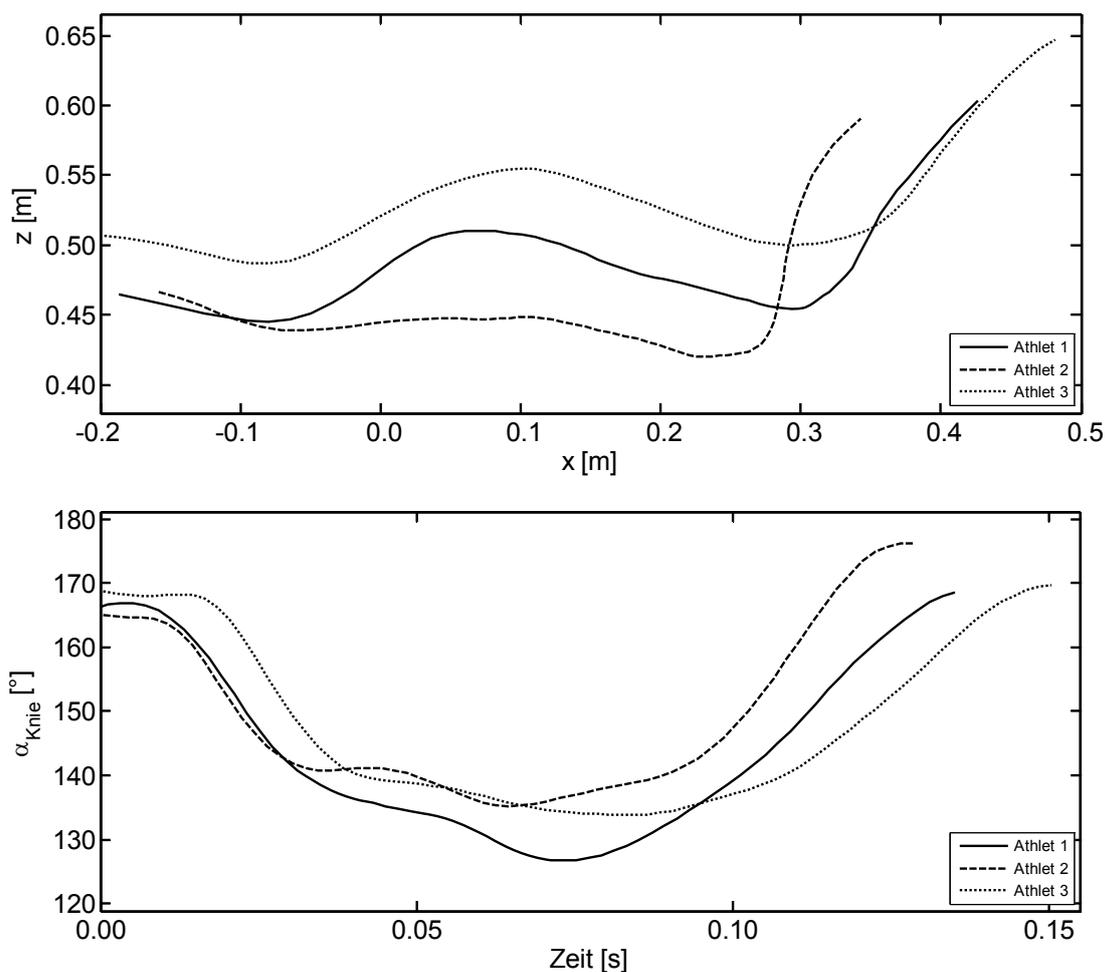


Abb. 4.6: Exemplarische Kniepositionsverläufe (oben) und Kniewinkelverläufe α_{Knie} (unten) von Sprüngen dreier Athleten.

Dem Tiefpunkt im Positionsverlauf (Abb. 4.6 oben) folgt, in mehr oder weniger ausgeprägter Form, das Hebeln über die Unterstützungsstelle. Dies wird in der „kreisbogenförmigen“ Kurve der Grafen ersichtlich (siehe vor allem Athlet 1). Dass die Nullstelle (in Abb. 4.6 oben) hier nicht exakt über dem Höhepunkt der Kreiskurve liegt, hängt vor allem damit zusammen, dass die Nullstelle den Mittelpunkt der Kraftmessplatte kennzeichnet und der Fußaufsatz oft im vorderen Bereich der Platte erfolgt.

Das folgende Abfallen der Kurve ergibt sich, nachdem das Knie die Stützstelle passiert hat. Da der Unterschenkel jetzt in die Sprungrichtung weiter geschoben, das heißt rotiert wird, fällt die Positionshöhe wieder ab. Während des Passierens der Unterstützungsstelle wird das Knie weiter gebeugt (Abb. 4.6 unten). Anschließend beginnt die Streckung des Sprungbeins insbesondere über den Fußabdruck und teilweise etwas zeitversetzt über die Kniestreckung, womit auch die Kniepositionen wieder höher werden. Die Kniestreckung

ist entweder mehr nach horizontal oder mehr nach vertikal orientiert, was an den Positionen bzw. an der Steigung der Verläufe (Abb. 4.6 oben) ablesbar ist. Hinsichtlich des Kniepositionsverlaufs sind für die drei dargestellten Absprünge zunächst Abweichungen bei den Anfangs- und Abflugbedingungen zu erkennen. Im Kniewinkelverlauf (Abb. 4.6 unten) ist in allen Kurven das Beugen und Strecken sowie das Ausmaß der Kniewinkeländerung zu sehen. Funktionell haben die beiden Kurven keinen direkten Bezug zueinander, da die Kniepositionsverläufe zudem von der Fußbewegung beeinflusst werden.

4.2.3 Körperschwerpunkttrajektorien

Mit den Körperschwerpunktpositionen werden einerseits Anfangs- und Abflugpositionen berechnet, die für weitere Analysen, wie die Berechnung der Geschwindigkeitsänderungen oder der theoretischen Sprungweite, benötigt werden. Andererseits wird über die Lage des Körperschwerpunkts der Stützwinkel bestimmt. Mit dem Stützwinkel und dem Kraftangriffswinkel kann dann der Zeitpunkt der Rotationsumkehr abgeschätzt werden.

Maßstab für das Absenken oder Umlenken während des Stützes ist der Körperschwerpunktverlauf, der in Abb. 4.7 exemplarisch für drei Athleten dargestellt ist. Da der Körperschwerpunkt mit der Absprungvorbereitung bereits abgesenkt ist, wird der tiefste Punkt unmittelbar nach dem Aufsetzen und somit – wie in den Beispielen oben (Abb. 4.6) zu sehen ist – vor dem Zeitpunkt, an dem der kleinste Kniewinkel gemessen wird, erreicht.

Während sich im Körperschwerpunktverlauf (über den Zeitraum des Stützes) Unterschiede bezüglich der Anfangs- und Abflugshöhe zeigen, die aber vor allem durch die unterschiedlichen Körpergrößen bedingt sind (gilt für Athlet 3), sind im interindividuellen Vergleich der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsverläufe Differenzen in den Anfangs- und Abfluggeschwindigkeiten erkennbar (siehe Abb. 4.8). Hierbei unterscheiden sich vor allem die horizontalen Geschwindigkeitsänderungen der Athleten unmittelbar nach dem Auftreffen.

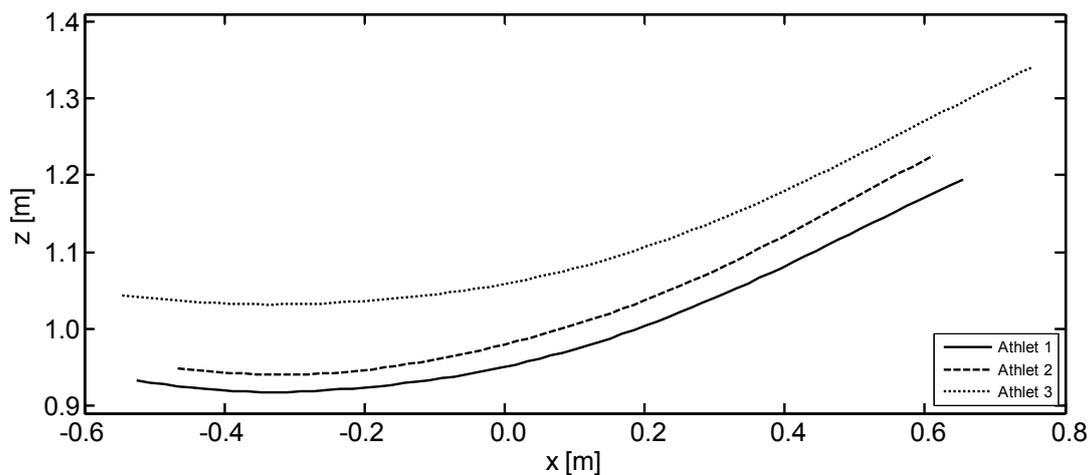


Abb. 4.7: Exemplarische KSP-Verläufe von Sprüngen dreier Athleten für Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

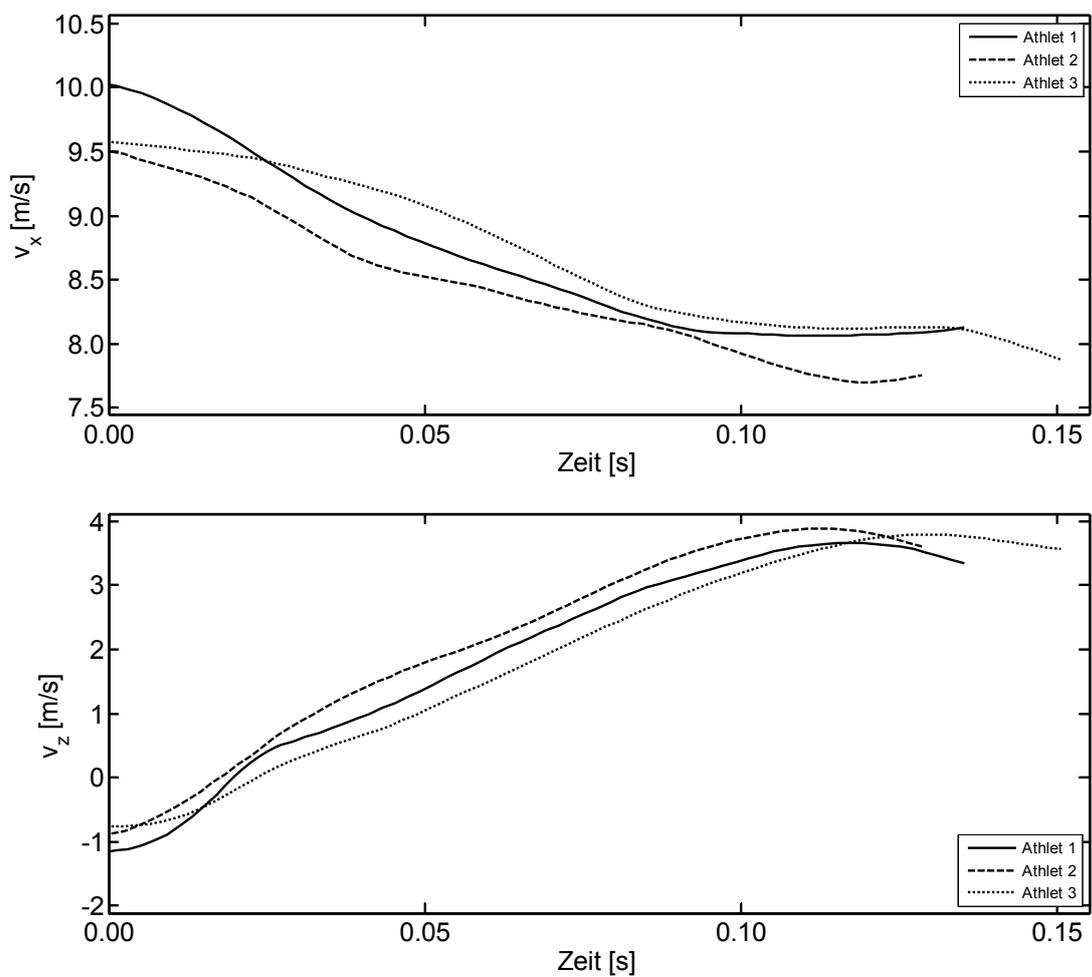


Abb. 4.8: Exemplarische horizontale v_x (oben) und vertikale v_z (unten) Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe des KSPs für Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf dreier Athleten.

4.2.4 Rotationsumkehr in der Stützphase

Die Verläufe von Stützwinkel und Kraftangriffswinkel geben anhand der Vorzeichenwechsel der Winkel Informationen über die Zeitpunkte, zu denen die mittlere Stütz- und die Beschleunigungsumkehr stattfindet und lassen Rückschlüsse über die in der Absprungbewegung entstehenden Vorwärts- und Rückwärtsrotationen zu.

Der Betrag der Stützwinkeländerung $\Delta\alpha_{Stütz}$ beschreibt den gesamten Stützverlauf vom Zeitpunkt des Einstemmens bis zum Lösen. Der Stützwinkel berechnet sich über die Gerade vom Knöchel zum Körperschwerpunkt. Zum Zeitpunkt des mittleren Stützes, also wenn $\alpha_{Stütz} = 0^\circ$, erfolgt ein Vorzeichenwechsel. Der Verlauf des Stützwinkels über den Absprungzeitpunkt ist, abhängig von der Größe der Stemmweite und der Abdruckweite, unterschiedlich steil. Der Betrag des Stützwinkels ist über den Gesamtverlauf im Mittel $\Delta\alpha_{Stütz} = 55.4^\circ \pm 2.9^\circ$ groß. Die maximalen Gesamtwinkel $\Delta\alpha_{Stütz}$ liegen bei 60.3° (Athlet 1), die kleinsten bei 50.1° .

Der Winkel des Kraftvektors $\alpha_{Kraftangriff}$ wird dabei über die Resultierende der Bodenreaktionskräfte über den gesamten Stütz, ausgehend vom Kraftangriffspunkt, zur Vertikalen berechnet. Der Verlauf der Kraftangriffsvektoren ist Abb. 4.9 zu entnehmen. Aufgrund der sehr schnell ansteigenden und sich stark ändernden Bodenreaktionskräfte beim Aufprall, sind die Kraftangriffswinkel zum Stützbeginn kaum quantifizierbar. Ähnlich instabil sind die Kraftangriffswinkel am Stützende.

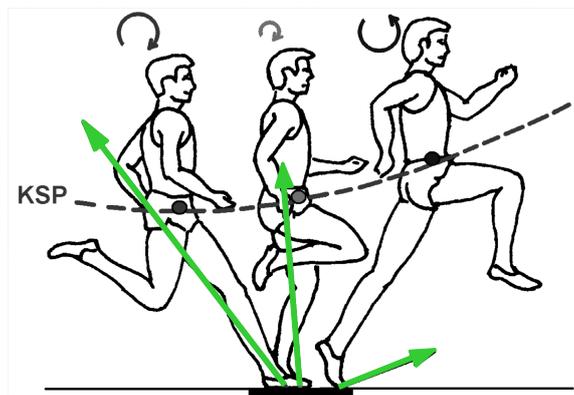


Abb. 4.9: Kraftangriffsvektoren in verschiedenen Absprungpositionen und entsprechenden Rotationsrichtungen (modifiziert nach Wank, 2007).

Die Wechselwirkung der beiden Winkel über die Stützzeit wird in Abb. 4.10 für die drei Athleten verglichen. Bei Stützbeginn ist der Kraftangriffswinkel vom Betrag her größer als der Stützwinkel (abgesehen von einem kleinen Überschwinger bei den Kraftmaxima

$F_{z,Max}$ zum Stützbeginn), das heißt, der Krafrichtungsvektor liegt hinter dem Stützwinkel. Dadurch erfährt der Springer eine Vorwärtsrotation. Zum Zeitpunkt des Vorzeichenwechsels $\alpha_{Kraftangriff} = 0^\circ$ findet die Beschleunigungsumkehr in horizontaler Richtung statt. Nach der Beschleunigungsumkehr steigt der Kraftangriffswinkel steil an. Vor dem Lösen werden kurzzeitig sehr hohe Kraftangriffswinkel bis zu 60° erreicht. Diese entstehen kurzzeitig durch das Abdrücken in horizontale Richtung (etwa bei $F_{x,Max}$), während die vertikalen Stützkkräfte sehr klein werden. Der Vorzeichenwechsel des Stützwinkels liegt dabei zeitlich vor dem des Kraftangriffswinkels. Zwischen dem mittleren Stütz und der Beschleunigungsumkehr vergehen etwa 0.02s. Wenn der Kraftangriffswinkel nach dem Zeitpunkt der Beschleunigungsumkehr stark ansteigt, schneiden sich Kraftangriffs- und Stützwinkel. Etwa an der Schnittstelle der beiden Winkel findet die Rotationsumkehr statt. Das heißt, der Weitspringer erfährt bezogen auf den Körperschwerpunkt nach der Rotationsumkehr am Ende der Stützphase eine Rückwärtsrotation. In Abb. 4.10 werden die Stützwinkel und die Kraftangriffswinkel der beschriebenen Sprünge zeitsynchron dargestellt.

Beim individuellen Vergleich ergeben sich für Stütz- und Kraftangriffswinkel je nach Anfangsposition und Stützzeit unterschiedliche Zeitverläufe. In den ausgewählten Beispielen werden sowohl der mittlere Stütz als auch die Bewegungsumkehr in Relation zur Stützzeit ungefähr zeitgleich erreicht. Für die Stützwinkel beim Einstieg zeigen sich kaum Unterschiede. Beim Abflug sind die der Athleten 1 und 2 etwas größer. Auch der Kraftangriffswinkel verläuft bei den drei Springern in etwa gleich. .

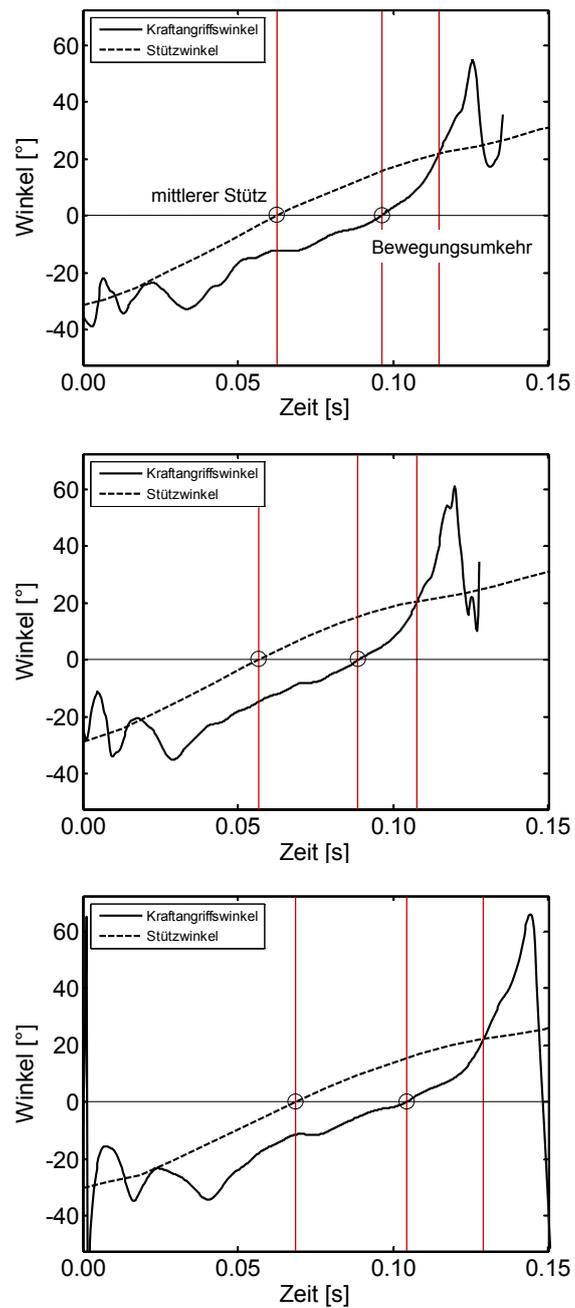


Abb. 4.10: Verlauf von Stützwinkel $\alpha_{Stütz}$ und Kraftangriffswinkel $\alpha_{Kraftangriff}$ der Weitsprünge der drei Athleten 1 (oben), 2 (Mitte) und 3 (unten).

4.2.5 Brems- und Beschleunigungsanteile in der Absprungphase

Mit Hilfe der Kraftdaten wurden die Geschwindigkeitsverluste in horizontaler Richtung und die Zunahme in vertikaler Richtung berechnet. Mit den durch den Körperschwerpunkt bestimmten Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$ und $v_{z,Einstieg}$ beim Fußaufsatz und den Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v_{x,Absprung}$ und $\Delta v_{z,Absprung}$ kann das Umsetzen der Anlaufgeschwindigkeit in horizontale und vertikale Abfluggeschwindigkeit beschrieben werden.

Die Differenz der mittleren Gesamtabfluggeschwindigkeiten ($v_{ges,Abflug} = 8.54\text{m/s} \pm 0.22\text{m/s}$) und der Gesamtanfangsgeschwindigkeiten ($v_{ges,Einstieg} = 9.47\text{m/s} \pm 0.25\text{m/s}$) zeigt für die analysierten Sprünge aus dem Wettkampfanlauf einen mittleren Geschwindigkeitsverlust von $\Delta v_{ges} = -0.93\text{m/s} \pm 0.15\text{m/s}$. Der Verlust der horizontalen Komponente bewirkt eine mittlere Reduktion von $\Delta v_{x,Absprung} = -1.39\text{m/s} \pm 0.20\text{m/s}$. Das entspricht einem mittleren Verlust an Horizontalgeschwindigkeit von $v_{x,Verlust} = 14.7\%$. Der vertikale Geschwindigkeitsgewinn liegt im Mittel bei $\Delta v_{z,Absprung} = 3.48\text{m/s} \pm 0.23\text{m/s}$. Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz der positiven vertikalen Abfluggeschwindigkeiten und der negativen vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten. Im Mittel steht der vertikale Geschwindigkeitsgewinn $\Delta v_{z,Absprung}$ dem horizontalen Geschwindigkeitsverlust $\Delta v_{x,Absprung}$ im Verhältnis 2.5:1 gegenüber. Die jeweiligen Geschwindigkeitsänderungen sind in Tab. 4.6 aufgelistet. Hier sind auch die Unterschiede zu den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf dargestellt. Die mittleren Anlauf- und Abfluggeschwindigkeiten wurden in Tab. 4.2 dargestellt.

Tab. 4.6: Mittlere horizontale und vertikale Geschwindigkeitsänderungen der Brems- $\Delta v_{x,Bremsen}$, $\Delta v_{z,Bremsen}$ und Beschleunigungsanteile $\Delta v_{x,Beschl}$, $\Delta v_{z,Beschl}$ der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

	$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Beschl}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Beschl}$ [m/s]
WkA	-1.39 ± 0.20	-1.52 ± 0.18	0.12 ± 0.02	3.48 ± 0.23	0.65 ± 0.11	2.83 ± 0.19
mA	-1.28 ± 0.26	-1.41 ± 0.23	0.13 ± 0.04	3.46 ± 0.31	0.60 ± 0.18	2.80 ± 0.48

In Tab. 4.7 sind die Anfangs- und Abfluggeschwindigkeiten der einzelnen Athleten aufgeführt. Tab. 4.8 gibt einen Überblick der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderungen über den gesamten Stütz und der jeweiligen Brems- und Beschleunigungsanteile der sieben Athleten.

Tab. 4.7: Mittelwerte (oberste Zeile), Minimal- und Maximalwerte der horizontalen und vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$, $v_{z,Einstieg}$ und Abfluggeschwindigkeiten $v_{x,Abflug}$, $\Delta v_{x,Abflug}$ für die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Athlet	$v_{x,Einstieg}$ [m/s]	$v_{z,Einstieg}$ [m/s]	$v_{x,Abflug}$ [m/s]	$v_{z,Abflug}$ [m/s]
1	9.56 ±0.22 min: 9.25 max: 9.87	-0.73 ±0.07 min: -0.62 max: -0.83	8.09 ±0.29 min: 7.78 max: 8.55	2.92 ±0.20 min: 2.57 max: 3.27
2	9.33 ±0.09 min: 9.22 max: 9.45	-0.58 ±0.10 min: -0.38 max: -0.70	8.05 ±0.17 min: 7.77 max: 8.26	2.86 ±0.16 min: 2.61 max: 3.12
3	9.60 ±0.06 min: 9.56 max: 9.64	-0.64 ±0.00 min: -0.64 max: -0.64	8.29 ±0.17 min: 8.17 max: 8.41	2.73 ±0.20 min: 2.59 max: 2.87
4	9.21 ±0.08 min: 9.15 max: 9.26	-0.55 ±0.00 min: -0.55 max: -0.55	7.92 ±0.01 min: 7.91 max: 7.92	2.77 ±0.04 min: 2.74 max: 2.79
5	9.17 ±0.07 min: 9.07 max: 9.27	-0.63 ±0.10 min: -0.48 max: -0.75	7.85 ±0.17 min: 7.62 max: 8.08	2.72 ±0.16 min: 2.49 max: 2.91
6	9.66 ±0.06 min: 9.61 max: 9,70	-0.67 ±0.03 min: -0.65 max: -0.69	8.26 ±0.18 min: 8.13 max: 8.38	2.92 ±0.21 min: 2.77 max: 3.07
7	9.49	-0.42	8.38	2.56
M	9.45 ±0.25	-0.65 ±0.11	8.06 ±0.24	2.84 ±0.19

Tab. 4.8: Mittelwerte (oberste Zeile), Minimal- und Maximalwerte der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x,Absprung}$, $\Delta v_{z,Absprung}$ mit den horizontalen Brems- und Beschleunigungsanteilen $\Delta v_{x,Bremsen}$, $\Delta v_{x,Beschl}$ und den vertikalen Brems- und Beschleunigungsanteilen $\Delta v_{z,Bremsen}$, $\Delta v_{z,Beschl}$ der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Athlet	$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Beschl}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Beschl}$ [m/s]	α_{Abflug} [°]
1	-1.56 ±0.15 min: -1.30 max: -1.73	-1.68 ±0.14 min: -1.45 max: -1.83	0.12 ±0.02 min: 0.09 max: 0.15	3.65 ±0.20 min: 3.30 max: 3.91	0.73 ±0.07 min: 0.62 max: 0.83	2.92 ±0.20 min: 2.57 max: 3.27	20.7 ±1.66 min: 17.5 max: 22.8
2	-1.28 ±0.14 min: -0.99 max: -1.45	-1.41 ±0.13 min: -1.15 max: -1.56	0.13 ±0.02 min: 0.10 max: 0.16	3.44 ±0.15 min: 3.22 max: 3.66	0.58 ±0.10 min: 0.38 max: 0.70	2.85 ±0.16 min: 2.60 max: 3.12	20.3 ±1.32 min: 18.3 max: 22.3
3	-1.31 ±0.11 min: -1.23 max: -1.39	-1.45 ±0.08 min: -1.39 max: -1.50	0.14 ±0.04 min: 0.11 max: 0.16	3.37 ±0.19 min: 3.23 max: 3.50	0.64 ±0.00 min: 0.64 max: 0.64	2.72 ±0.19 min: 2.59 max: 2.86	19.1 ±1.56 min: 18.0 max: 20.2
4	-1.29 ±0.07 min: -1.24 max: -1.34	-1.39 ±0.08 min: -1.33 max: -1.45	0.10 ±0.01 min: 0.09 max: 0.11	3.32 ±0.05 min: 3.28 max: 3.35	0.55 ±0.00 min: 0.55 max: 0.55	2.76 ±0.05 min: 2.73 max: 2.80	20.2 ±0.21 min: 20.0 max: 20.3
5	-1.32 ±0.16 min: -1.10 max: -1.52	-1.44 ±0.14 min: -1.26 max: -1.63	0.12 ±0.03 min: 0.09 max: 0.16	3.35 ±0.17 min: 3.17 max: 3.53	0.63 ±0.10 min: 0.48 max: 0.75	2.72 ±0.16 min: 2.50 max: 2.91	20.0 ±1.43 min: 18.2 max: 21.9
6	-1.40 ±0.25 min: -1.22 max: -1.57	-1.52 ±0.25 min: -1.34 max: -1.69	0.12 ±0.00 min: 0.12 max: 0.12	3.59 ±0.24 min: 3.42 max: 3.76	0.67 ±0.03 min: 0.65 max: 0.69	2.93 ±0.22 min: 2.77 max: 3.08	20.1 ±1.56 min: 19.0 max: 21.2
7	-1.11 –	-1.24 –	0.13 –	2.99 –	0.42 –	2.58 –	17.8 –
M	-1.39 ±0.20	-1.52 ±0.18	0.12 ±0.02	3.48 ±0.23	0.65 ±0.11	2.83 ±0.19	20.2 ±1.47

Die Randbereiche von horizontaler und vertikaler Geschwindigkeitsänderung zeigen für die Athletengruppe die Sprünge von Athlet 1 und 2. Für den weitesten Sprung mit $W = 7.45\text{m}$ wurde der größte horizontale Geschwindigkeitsverlust von $\Delta v_{x,Absprung} = -1.72\text{m/s}$ gemessen ($v_{x,Einstieg} = 9.84\text{m/s}$, $v_{x,Abflug} = 8.12\text{m/s}$). In vertikaler Richtung wurde allerdings für diesen Sprung auch der größte vertikale Geschwindigkeitsgewinn mit $\Delta v_{z,Absprung} = 3.91\text{m/s}$ ($v_{z,Abflug} = 3.27\text{m/s}$) erreicht (siehe Abb. 4.11: Athlet 1). Der kleinste horizontale Geschwindigkeitsverlust $\Delta v_{x,Absprung} = -0.99\text{m/s}$ wiederum entsteht bei einem Sprung mit $W = 7.00\text{m}$ ($v_{x,Einstieg} = 9.25\text{m/s}$, $v_{x,Abflug} = 8.26\text{m/s}$). Der vertikale Geschwindigkeitsgewinn beträgt dabei $\Delta v_{z,Absprung} = 3.22\text{m/s}$ ($v_{z,Abflug} = 2.61\text{m/s}$) und

ist somit im unteren Bereich der erreichten vertikalen Geschwindigkeitsgewinne angesiedelt (siehe Abb. 4.11: Athlet 2).

Abb. 4.11 stellt die vertikalen Geschwindigkeitsgewinne $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ über die horizontalen Geschwindigkeitsverluste $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ aller Sprünge aus dem Wettkampfanlauf dar.

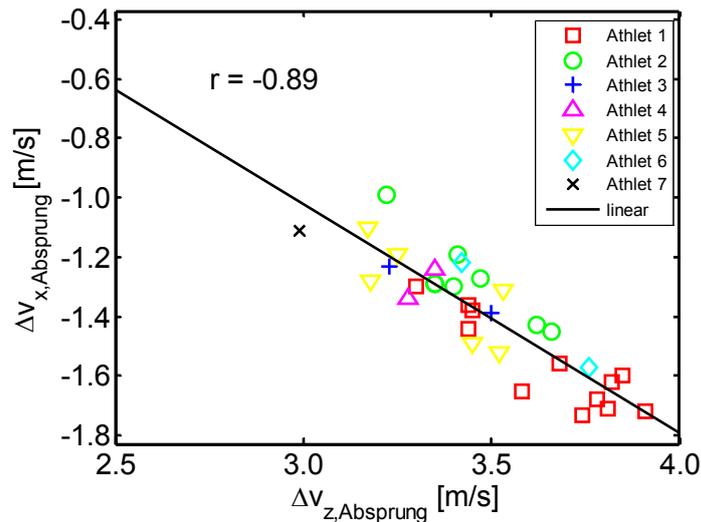


Abb. 4.11: Zusammenhang der horizontalen Geschwindigkeitsverluste $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ und der vertikalen Geschwindigkeitsgewinne $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ für die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Anhand der Grafik ist erkennbar, dass einzelne Weitspringer mehr horizontal bremsen (Mehrzahl der Sprünge von Athlet 1) als andere (Athlet 3, 4, 7). Außerdem gelingt es einigen sehr gut, in vertikale Richtung zu beschleunigen (Mehrzahl der Sprünge von Athlet 1) während andere hier weniger Zugewinn erzielen können (Athlet 3, 4 und 7). Die Ergebnisse der Stichprobe veranschaulichen, dass größere Zugewinne für die vertikale Abflugrichtung $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ größere Geschwindigkeitsverluste in horizontaler Richtung $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ mit sich bringen. Dieser Zusammenhang kann mit $r = -0.888^{**}$ bestätigt werden. Abb. 4.11 zeigt die entsprechende Regressionsgerade.

Geringe horizontale Geschwindigkeitsverluste treten bei der Athletengruppe eher in Verbindung mit wenig Kniewinkeländerung auf (siehe Athlet 2 und 5). Für das Verhältnis von Kniewinkeländerung $\Delta \alpha_{\text{Knie, Beugen}}$ und horizontalem Bremsanteil $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ lässt sich ein Zusammenhang von $r = -0.715^{**}$ nachweisen (siehe Abb. 4.12). Stellt man die Kniewinkeländerung beim Strecken $\Delta \alpha_{\text{Knie, Abdruck}}$ der vertikalen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ gegenüber, so zeigt sich aber, dass große Geschwindigkeits-

gewinne in vertikaler Richtung nicht mit einer ausgeprägten Streckbewegung, also nicht über eine große Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$, erreicht werden ($r = 0.328$). Die Streckbewegung in vertikale Richtung bestimmt jedoch den Abflugwinkel ($r = 0.809^{**}$) und begünstigt die Abflugposition durch die so entstehende größere Abflughöhe z_0 .

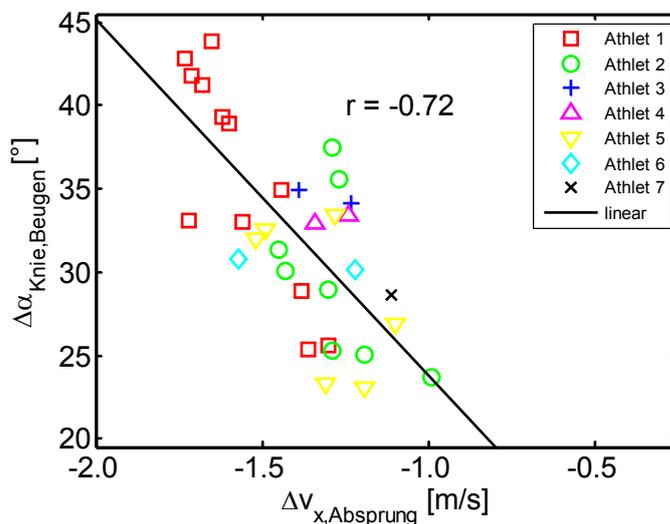


Abb. 4.12: Zusammenhang der Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ des Sprungbeins und der horizontalen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x,Absprung}$ für die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

4.2.6 Abfluggeschwindigkeit und Winkel

Die Gesamtabfluggeschwindigkeit ergibt sich aus der Kombination der vertikalen und horizontalen Geschwindigkeitsvektoren. Die Größe der vertikalen Abfluggeschwindigkeit determiniert die Größe des Abflugwinkels. Dominiert werden die Abfluggeschwindigkeiten jedoch durch die horizontalen Geschwindigkeitsanteile. Der mittlere Abflugwinkel der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf mit $\alpha_{Abflug} = 20.2^\circ \pm 1.74^\circ$ errechnet sich aus horizontalen Abfluggeschwindigkeiten von $v_{x,Abflug}$ zwischen 7.62m/s und 8.55m/s (M: $v_{x,Abflug} = 8.06\text{m/s} \pm 0.24\text{m/s}$) und vertikalen Abfluggeschwindigkeiten zwischen 2.49m/s und 3.27m/s (M: $v_{z,Abflug} = 2.84\text{m/s} \pm 0.19\text{m/s}$). Als größter Abflugwinkel wurde $\alpha_{Abflug} = 22.8^\circ$ erreicht, der kleinste Winkel beträgt $\alpha_{Abflug} = 17.5^\circ$. Die Differenz von 5.3° verdeutlicht, wie unterschiedlich die Umlenkung in der Absprungphase gestaltet wird. Tab. 4.9 sind die Parametergrößen zu entnehmen.

Tab. 4.9: Mittlere Abfluggeschwindigkeiten $v_{x,Abflug}$, $v_{z,Abflug}$, $v_{ges,Abflug}$ und Abflugwinkel α_{Abflug} der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

	$v_{x,Abflug}$ [m/s]	$v_{z,Abflug}$ [m/s]	$v_{ges,Abflug}$ [m/s]	α_{Abflug} [°]
WkA	8.06 ± 0.24	2.84 ± 0.19	8.54 ± 0.22	20.2 ± 1.47
mA	7.70 ± 0.34	2.86 ± 0.25	8.22 ± 0.26	21.3 ± 2.30

Der Abflugwinkel wird auch durch die horizontale Geschwindigkeitsänderung des Bremsens $\Delta v_{x,Bremsen}$ und die vertikale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{z,Absprung}$ beeinflusst, da sie die Richtung der Abfluggeschwindigkeit mitbestimmen.

Große Winkel werden bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf sowohl bei langsameren als auch bei schnelleren Anlaufgeschwindigkeiten erreicht. Die Größe der Abflugwinkel – und damit die Umlenkung der Anlaufgeschwindigkeit in vertikaler Richtung – sind für die homogene Stichprobe der Wettkampfanläufe unabhängig von den entsprechenden Anlaufgeschwindigkeiten ($r = -0.077$). Dies ist in Abb. 4.13 dargestellt.

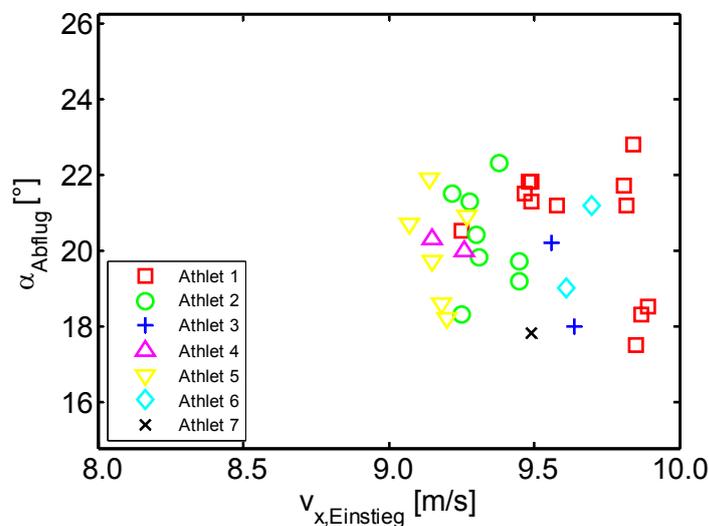


Abb. 4.13: Abhängigkeit der Abflugwinkel α_{Abflug} von der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg}$ der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Athleten mit etwas unterschiedlichen, aber individuell typischen horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten auf dem Absprungbrett

auftreffen. In der intraindividuellen Streuung der Abflugwinkel spiegelt sich die Steuerung der horizontalen und vertikalen Anteile der Abfluggeschwindigkeit wider.

Wie in Abb. 4.13 zu erkennen ist, streuen die Abflugwinkel, der einzelnen Weitspringer (siehe Athlet 1, 2 und 5), so dass kein Trend für den einzelnen Athleten erkennbar ist. Im Vergleich zu den bisher betrachteten leistungsbestimmenden Parametern ist die Standardabweichung des Abflugwinkels für die einzelnen Athleten relativ groß. Betrachtet man die Beträge der Abfluggeschwindigkeit, so sind interindividuelle Unterschiede bei den einzelnen Weitspringern erkennbar. Beispielsweise springt Athlet 5 durchschnittlich mit weniger horizontaler Geschwindigkeit ab als die Athleten 2, 3, 6 und 7.

4.2.7 Vertikaler und horizontaler Brems- und Beschleunigungskraftstoß

Die Analyse der Bodenreaktionskräfte liefert neben den Erkenntnissen der Geschwindigkeiten und der kinematischen Bewegungsmerkmale weitere Informationen. Mithilfe der Information über den Zeitpunkt der Bewegungsumkehr in vertikaler Richtung wurden die vertikalen Kraftstöße, bestehend aus dem Bremsanteil $-S_z$ und dem Beschleunigungsanteil $+S_z$, ermittelt. Der Übergang von Bremsen zu Beschleunigen in horizontaler Richtung trennt die horizontalen Kraftstöße $-S_x$ und $+S_x$ über den Zeitpunkt der Beschleunigungsumkehr $a_{x,KSP} = 0 \text{ m/s}^2$. Anhand des Kurvenverlaufs mit den Kraftspitzen können Rückschlüsse über die generierten Kräfte im Umlenkprozess und damit über den Bewegungsablauf gezogen werden.

Die Kraftstöße S_z und S_x sind abhängig von der Masse des Springers. Bei den Kraftstößen wie auch bei den Geschwindigkeitsänderungen werden im Folgenden in horizontale Richtung die Brems- und Beschleunigungsanteile $-S_x$ und $+S_x$ und in vertikale Richtung entsprechend $-S_z$ und $+S_z$ betrachtet. Mit den horizontalen Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v_{x,Absprung}$ und den vertikalen $\Delta v_{z,Absprung}$ werden ergänzend die Geschwindigkeitsverluste und -gewinne verglichen und die Qualität des Umlenkbewegung bewertet. Hier werden entsprechend die Brems- und Beschleunigungsanteile in horizontaler Richtung mit $\Delta v_{x,Bremsen}$ und $\Delta v_{x,Beschl}$ und in vertikaler Richtung mit $\Delta v_{z,Bremsen}$ und $\Delta v_{z,Beschl}$ beschrieben. Abb. 4.14 zeigt die untersuchten Parameter der Kraftstöße, auf die im Folgenden eingegangen wird.

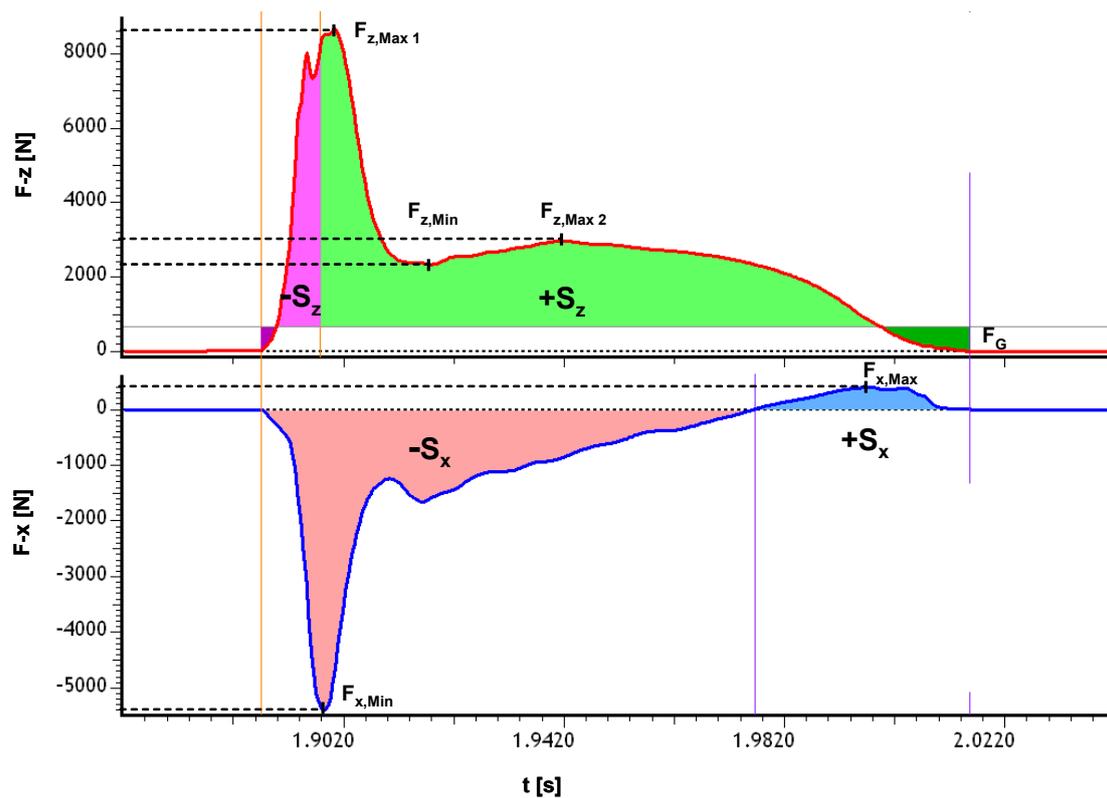


Abb. 4.14: Vertikale Brems- und Beschleunigungskraftstöße $-S_z, +S_z$ (oben) und horizontale Brems- und Beschleunigungskraftstöße $-S_x, +S_x$ (unten). Zur besseren Veranschaulichung sind die horizontalen Kraftstöße auf der Ordinatenachse größer skaliert.

Beim Weitsprung aus dem Wettkampfanlauf machen die vertikalen Bodenreaktionskräfte S_z den größeren Teil der Kraftstöße aus. Sie liegen im Mittel bei $S_z = 261.0\text{Ns} \pm 22.99\text{Ns}$. Im Vergleich zu den horizontalen Kraftstößen, die im Mittel bei $S_x = -104.31\text{Ns} \pm 15.12\text{Ns}$ liegen, sind die vertikalen Kraftstöße S_z 2.5 mal größer. Der vertikale Kraftstoß setzt sich aus dem Bremskraftstoß $-S_z$ ($M : 48.52\text{Ns} \pm 8.48\text{Ns}$) und dem Beschleunigungskraftstoß $+S_z$ ($M : 212.47\text{Ns} \pm 18.76\text{Ns}$) zusammen. Der horizontale Kraftstoß S_x wird durch den Bremskraftstoß $-S_x$ ($M : -113.52\text{Ns} \pm 14.72\text{Ns}$) dominiert. Dabei trägt der horizontale Beschleunigungsanteil mit $+S_x$ ($M : = 9.21\text{Ns} \pm 1.83\text{Ns}$) nur einen geringen Betrag zum Gesamtkraftstoß bei. Tab. 4.10 zeigt die mittleren Werte der horizontalen und vertikalen Brems- und Beschleunigungsanteile für den Weitsprung aus dem Wettkampfanlauf sowie aus dem mittleren Anlauf, auf die im Folgenden Bezug genommen wird.

Tab. 4.10: Mittlere vertikale und horizontale Kraftstoßanteile $-S_z, +S_z$ und $-S_x, +S_x$ der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

	$-S_z$ [Ns]	$+S_z$ [Ns]	S_z [Ns]	$-S_x$ [Ns]	$+S_x$ [Ns]	S_x [Ns]
WkA	48.52 ±8.48	212.47 ±18.76	261.0 ±22.99	-113.52 ±14.72	9.21 ±1.83	-104.31 ±15.12
mA	44.45 ±15.83	212.74 ±41.46	257.22 ±50.88	-104.85 ±25.12	9.68 ±2.86	-95.17 ±25.44

Leistungsbestimmend sind der vertikale Beschleunigungsanteil $+S_z$ und der horizontale Bremsanteil $-S_x$, wobei der vertikale Kraftzugewinn 1.9 mal größer als der Verlust durch die horizontale Bremskraft ist.

Um die Kraft-Zeit-Verläufe sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung interpretieren und vergleichen zu können, müssen die zugrunde liegenden mechanischen Vorgänge sowie der zeitliche Verlauf von Teilkörperbewegungen in der Stemm- und Absprungbewegung analysiert werden. Neben den Kraftstößen geben die Kraftspitzen $F_{z,Max1}$, $F_{z,Max2}$, das Zwischenminimum $F_{z,Min}$ sowie $F_{x,Min}$ und $F_{x,Max}$ (siehe Abb. 4.14) Aufschluss über das Auftreff- und Absprungsverhalten. Die mittleren Kraftmaxima und Kraftminima sind in Tab. 4.11 dargestellt.

Tab. 4.11: Mittlere Kraftmaxima und -minima der vertikalen $F_{z,Max1}$, $F_{z,Min}$, $F_{z,Max2}$ und horizontalen $F_{x,Min}$, $F_{x,Max}$ Kraftstöße mit Zeitpunkten, zu denen sie erreicht werden für die Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

	$F_{z,Max1}$ [N]	$F_{z,Min}$ [N]	$F_{z,Max2}$ [N]	$F_{x,Min}$ [N]	$F_{x,Max}$ [N]
WkA	8711 ±1222	2397 ±298	3435 ±370	-4970 ±701	391 ±80
Zeitpunkt t [s]	0.014	0.032	0.056	0.013	0.117
mA	8033 ±1583	2424 ±273	3420 ±407	-4338 ±809	394 ±82
Zeitpunkt t [s]	0.014	0.032	0.055	0.013	0.118

Das erste vertikale Kraftmaximum lässt sich mechanisch durch die Anfangsgeschwindigkeiten (aus dem Verhältnis von horizontalem und vertikalem Anteil), die Anfangsposition beim Einstemmen, das Gewicht des Springers sowie durch das Abbremsen der relativ starren und distalen Massen erklären.

Für die Kraftspitze des vertikalen Bremskraftstoßes $F_{z,Max1}$ wurden Kräfte zwischen 6586N (Athlet 1) und 11503N (Athlet 5) gemessen (M: $F_{z,Max1} = 8711\text{N} \pm 1222\text{N}$). Das erste Maximum wird, ausgehend von der mittleren Stützzeit von $t_{Stütz} = 0.130\text{s}$, im Mittel nach 0.014s erreicht. Der Vergleich der interindividuellen Streuung des ersten vertikalen Kraftmaximums $F_{z,Max1}$ innerhalb eines Messtermins zeigt bei gleichen konstitutionellen

Gegebenheiten, gleichem Gewicht und nahezu gleichen Anlaufgeschwindigkeiten, bei einem Weitspringer Streuungen von bis zu 1344N. Das entspricht 16% Abweichung zwischen größtem und kleinstem Wert. Zwischen den einzelnen Messterminen streuen die Werte von einzelnen Springern sogar um bis zu 1958N, was für diesen Weitspringer eine Abweichung von 23% bedeutet. Trotz der intraindividuellen Abweichungen ist für das erste vertikale Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ ein typbedingter Streubereich erkennbar.

Für die oben genannten mechanischen Bedingungsgrößen lassen sich jedoch keine statistischen Belege finden. Die Korrelation von $F_{z,Max1}$ und der Anlaufgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg}$ sowie $v_{ges,Einstieg}$ zeigt für die Stichprobe keinen Zusammenhang ($r = -0.311$ sowie $r = 0.317$). Auch die vertikale Anfangsgeschwindigkeit $v_{z,Einstieg}$ und das vertikale Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ weisen keinen Zusammenhang auf ($r = 0.349^*$). Hinsichtlich der Masse m der Springer und des Kraftmaximums $F_{z,Max1}$ liegt statistisch ebenfalls kein Zusammenhang vor ($r = 0.231$). Den Werten der Stichprobe zufolge setzt sich das erste vertikale Kraftmaximum demnach aus verschiedenen Kombinationen der Bedingungsgrößen zusammen, die von Athlet zu Athlet unterschiedlich ausgeprägt sind.

Der vertikale Bremskraftstoß $-S_z$ (geteilt durch die Masse) entspricht bis zum Zeitpunkt von $v_{KSP} = 0\text{m/s}$ der Größe der vertikalen Geschwindigkeit $v_{z,Einstieg}$ beim Einstieg.

Im Kurvenverlauf des ersten vertikalen Kraftstoßes $-S_z$ zeigt sich bei manchen Sprüngen ein zweigipfliger Peak. Beide Kraftspitzen (wenn es zwei sind) befinden sich, bis auf zwei Ausnahmen, vor dem Zeitpunkt der Bewegungsumkehr $v_{z,KSP} = 0$. Für einige Weitspringer ist ein zweigipfliger Kurvenverlauf typisch, andere hingegen weisen einen relativ spitzen und eingipfligen vertikalen Peak auf. Dazwischen gibt es weitere Ausprägungsformen. Die Verläufe der ersten Kraftmaxima wurden in vier Gruppen unterteilt und wie folgt bezeichnet: (1) ausgeprägter Doppel-Peak, (2) Doppel-Peak, (3) Ansatz zum Doppel-Peak und (4) einfacher Peak. Abb. 4.15 zeigt die definierten Kategorien.

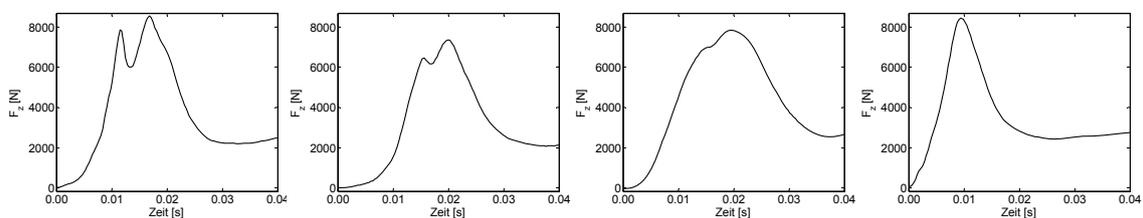


Abb. 4.15: Unterschiedliche Kurvenverläufe für den ersten Teil des vertikalen Kraftstoßes. Von links: ausgeprägter Doppel-Peak, Doppel-Peak, Ansatz zum Doppel-Peak und einfacher Peak.

Ein zweigipfliger Peak zeigt sich bei drei Springern, ein zumindest ansatzweise erkennbarer zweigipfliger Peak bei vier weiteren Springern. Bei einem Athleten lassen sich über den Verlauf der drei Jahre alle beschriebenen Muster wiederfinden (Athlet 1). Ein anderer zeigt erst im dritten Messjahr einen zweigipfligen Peak (Athlet 2). Die übrigen Athleten weisen gleichbleibende Kurvenverläufe mit einem zweigipfligen Peak auf (Athlet 3, 4 und 5).

Die zweigipfligen Kurvenverläufe können in Bezug auf die Zeit, in der sie stattfinden und in Bezug auf die Größe der Ausprägung in zweierlei Hinsicht interpretiert werden. Zum einen betrifft dies das Aufsetzen des Sprungbeins. Setzt der Fuß auf der Ferse auf und schlägt der Fuß dann auf der ganzen Sohle auf, ist dadurch mit einem verzögerten zusätzlichen Kraftstoß zu rechnen. Die Verschiebung des Fußes weiter in Sprungrichtung kann außerdem einen kleinen zusätzlichen Kraftanstieg zur Folge haben. Das „Aufpatschen“ des Fußes vom ersten Kontakt bis zum vollständigen Aufsetzen erfolgt in einem Zeitraum von etwa 0.01s. Dies entspricht der Bildfrequenz von zwei aufgenommenen Videobildern. Nach dem vollständigen Aufsetzen ist in den Videobildern bei allen Sprüngen eine Verschiebung des Fußes zu sehen, was ebenfalls über einen Bildwechsel hinweg dauert. Demzufolge könnte der zweite Gipfel des ersten vertikalen Kraftstoßes durch das Abklappen und Nachrutschen des Fußes erklärt werden.

Theoretisch müssten auch die von Gruber et al. (1987) beschriebenen Effekte des Nachschwabbens der distalen Massen im Kraftstoß sichtbar sein. Die Autoren legen dar, dass beim Aufprall zunächst die starren Anteile, also die Ferse, Unterschenkel, Oberschenkel und letztlich die Knochen des Rumpfes auf 0m/s beschleunigt (gebremst) werden. Die Weichteile wie Muskeln und Gewebe, aber auch die inneren Organe bewegen sich zum Zeitpunkt $v_{KSP} = 0\text{m/s}$ noch weiter und werden erst über ihre vollständige Dehnung „gebremst“. Dies zieht letztlich die Weichteile wieder zurück, wodurch eine verzögerte Beschleunigung durch die Weichteile, das Nachschwabben, stattfindet. Der entstehende Impuls durch die Schwabbelmassen wird auf den Gesamtimpuls addiert. Wann der Zeitpunkt dieser Entlastung jedoch beim Weitsprungabsprung ist, kann nicht beantwortet werden. Zudem liegen für die spezifische Aufprallbedingung des Weitsprungs bezüglich der Geschwindigkeitsänderung für die Weichteile keine Vergleichswerte vor. Die Relevanz des Modells und der Effekte der Schwabbelmassen kann somit nur schwer abgeschätzt werden.

Prinzipiell ergeben sich größere erste vertikale Kraftspitzen dann, wenn die Konstitution des auftreffenden Körpers starrer oder steifer ist. Ist das Sprungbein und auch der restliche Körper des Weitspringers beim Auftreffen steifer, das heißt geben Fußgelenk, Kniegelenk

und Rumpf den in vertikaler Richtung wirkenden Kräften nur wenig nach, so sind für das erste Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ größere Werte zu erwarten. Das Nachgeben oder auch ein starkes Ausbrechen des Knies oder des Fußes hingegen würde zur Folge haben, dass kleinere Kräfte gemessen werden.

Grundsätzlich resultiert das erste vertikale Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ aus den Anteilen der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten beim Auftreffen. Somit können sich auch Unterschiede durch die verschiedenen Stemmwinkel ergeben. Schwer abschätzbar sind hierbei der Einfluss, der durch die unterschiedlichen Anfangspositionen sowie die Gelenkwinkel von Knie und Hüfte beim Auftreffen zustande kommt. Auch das unterschiedliche Aufsetzen des Sprungfußes kann sich auf das absolute Kraftmaximum auswirken.

Die größte Belastung für das Sprungbein ergibt sich durch die enorme Krafteinwirkung des Aufpralls, dem die exzentrische Muskulatur etwa 0.015s entgegen wirken muss. Die Steifigkeit kann zu diesem Zeitpunkt nur durch die mittels Vorinnervierung generierte Muskelspannung erreicht werden. Die Kniewinkeländerung ist bis zum Zeitpunkt von 0.01s sehr gering und zeigt für die einzelnen Weitspringer – unabhängig von der Anfangsposition beim Auftreffen – nahezu gleiche Verläufe. Erst ab 0.03s lassen sich für die Kniewinkeländerung Unterschiede nachweisen (siehe Abb. 4.6).

Für das Zwischenminimum $F_{z,Min}$ wurden Werte von 2091N bis 3101N gemessen (M: $F_{z,Min} = 2397N \pm 298N$). Der mittlere Zeitpunkt des Erreichens des Zwischenminimums ist nach 0.032s. Zusammenhänge zu dynamischen Absprungparametern lassen sich nicht nachweisen. Für das zweite Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ werden Kräfte von 2755N bis 4248N erreicht (M: $F_{z,Max2} = 3435N \pm 370N$). Es wird nach 0.056s erreicht, also zeitlich in der Hälfte der gesamten Stützzeit. Die Differenz vom Zwischenminimum $F_{z,Min}$ zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ liegt im Mittel bei 1021N. Das Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ ist dabei im Mittel 1.44 mal größer als das Zwischenminimum $F_{z,Min}$, das heißt der Kraftzuwachs liegt durchschnittlich bei 44%

Geht man von einer Kraftentlastung vor dem Zwischenminimum aus, ist zu erwarten, dass schwerere Athleten, bei theoretisch gleicher Steifigkeit, größere Werte für das Zwischenminimum aufweisen. Mit der relativen Beschreibung des Kraftzuwachses vom Kraftminimum $F_{z,Min}$ zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ wurde der Zuwachs unabhängig von der Masse der Athleten bewertet. Anhand des Quotienten ($F_{z,Max2} / F_{z,Min}$) können so die individuellen Unterschiede veranschaulicht und mit den kinematischen Bewegungsmustern verglichen werden. Ein größerer Zuwachs allein ist jedoch nicht leistungsbestimmend. Für einen größeren vertikalen Beschleunigungs-

kraftstoß $+S_z$ sollte ebenso das Zwischenminimum $F_{z,Min}$ möglichst groß ausgeprägt sein. Dieses wiederum wird durch die exzentrische Muskelarbeit bestimmt, also durch ein geringeres Nachgeben und somit wenig Kniewinkeländerung. Darauf wird im Folgenden genauer eingegangen. Abb. 4.16 veranschaulicht den individuellen Kraftzuwachs der Weitspringer vom Kraftminimum $F_{z,Min}$ zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max2}$. Dem relativen Zugewinn ist zu entnehmen, dass die Athleten im vertikalen Kraftstoß ein jeweils typisches Muster zeigen. Dies betrifft vor allem für Athlet 2, 3, 4 und 5.

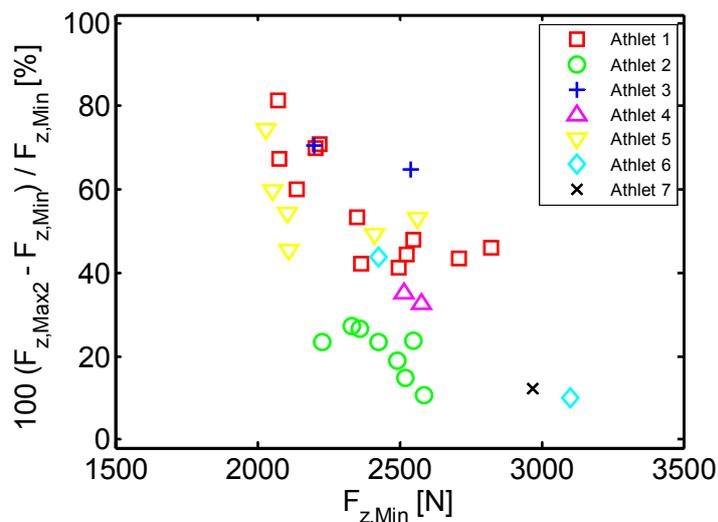


Abb. 4.16: Kraftzuwachs vom Zwischenminimum $F_{z,Min}$ zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max}$ in Abhängigkeit vom Ausgangswert $F_{z,Min}$ für Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf.

Das Kraftminimum im horizontalen Bremssteil liegt im Mittel bei $F_{x,Min} = -4970\text{N} \pm 701\text{N}$. Es wird durchschnittlich nach 0.013s und somit etwa zeitgleich zum ersten vertikalen Kraftmaximum erreicht. Die Kraftminima $F_{x,Min}$ streuen im Bereich von -7397N bis -3025N .

Die Beschleunigungsumkehr wird im Mittel nach 0.092s erreicht. Der horizontale Beschleunigungskraftstoß $+S_x$ erfolgt dann über eine mittlere Dauer von 0.04s. Im horizontalen Beschleunigungsanteil $+S_x$ werden Kraftmaxima $F_{x,Max}$ von 305.7N bis 568.5N erreicht (M: $F_{x,Max} = 391\text{N} \pm 80\text{N}$). Im Mittel können durch den horizontalen Beschleunigungsanteil nur 6.3% des Bremsanteils wieder als positiver Gewinn zurückgewonnen werden.

Der horizontale Kraftstoß S_x lässt sich mechanisch durch die Anfangsgeschwindigkeiten und die Anfangsposition beim Einstemmen des Springers erklären. Die Beschreibung des

horizontalen Bremskraftstoßes über die leistungsbestimmenden Bewegungsmerkmale ist ähnlich komplex wie die des vertikalen Bremskraftstoß. Eindeutige Zusammenhänge sind nicht erkennbar.

4.2.8 Verknüpfung kinematischer und dynamischer Zeitverläufe

Um den Kurvenverlauf der vertikalen und horizontalen Kräfte in Bezug zu den kinematischen Bewegungsmerkmalen interpretieren zu können, wurden in Abb. 4.18 bis Abb. 4.21 die Kraftverläufe von vier Sprüngen exemplarisch über den Körperschwerpunktverlauf sowie über Knie- und Hüftwinkelverläufe gelegt. Bei der Auswahl werden die besten und ebenso jeweils typische Sprünge von vier unterschiedlichen Athleten gegenübergestellt, um so auch interindividuell Besonderheiten vergleichen zu können. In Abb. 4.17 sind die Bilddaten aus den Originalvideoaufnahmen und der resultierenden Beträge der Kraftwirkungslinien im Absprung übereinander gelegt und die wesentlichen Zeitpunkte relevanter Bewegungsmerkmale gekennzeichnet.

Der Zeitpunkt der vertikalen Bewegungsumkehr, bei dem der Körperschwerpunkt auf $v_{z,KSP} = 0\text{m/s}$ gebremst ist, findet etwa mit dem Erreichen des ersten vertikalen Kraftmaximums $F_{z,Max1}$ statt (Bild 4, Abb. 4.17). Bei manchen der analysierten Sprünge ist die Bewegungsumkehr vor (in den Beispielen: Athlet 2), bei manchen nach (in den Beispielen: Athlet 1) dem vertikalen Kraftmaximum $F_{z,Max1}$. Etwa zeitgleich ist auch das horizontale Kraftminimum $F_{x,Min}$ erreicht. Der Körperschwerpunkt befindet sich um diesen Zeitpunkt in seiner tiefsten Lage. Das Sprungbein hat sich vom Aufprall bis zu diesem Zeitpunkt (die ersten 0.02s) nur sehr gering gebeugt, was für eine sehr hohe Muskelaktivität für den ersten exzentrischen Teil der Beugung spricht.

Nach dem Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ fällt die vertikale Kraftkurve wieder genauso stark ab, (Bild 5 und 6, Abb. 4.17) während zeitgleich die Kniewinkeländerung größer wird, das heißt die Steifigkeit nachläßt. Demnach erfolgt in diesem weiterhin exzentrischen Abschnitt ein Nachlassen der Muskelaktivität bis das Zwischenminimum $F_{z,Min}$ erreicht ist (Bild 6, Abb. 4.17).

Während des Abfalls der Kraft bis zum Zwischenminimum $F_{z,Min}$ verharrt der Körperschwerpunkt noch in tiefer Position, bewegt sich aber ab da kontinuierlich nach oben. Aus dem Kniewinkelverlauf ist dabei zu erkennen, dass das Knie noch etwas weiter beugt, während der Springer sich in horizontaler Richtung bewegt (siehe Abb. 4.6). Ab etwa dem Erreichen des Zwischenminimums arbeitet die Muskulatur konzentrisch, was sich im Kraftanstieg zum zweiten Maximum $F_{z,Max2}$ erkennen lässt (Bild 8, Abb. 4.17).

Der kleinste Kniewinkel wird zeitlich um den Zeitpunkt des zweiten Kraftmaximums erreicht (Bild 9, Abb. 4.17). Unmittelbar davor oder zeitgleich sind die ersten Anzeichen des Lösens der Ferse erkennbar (Bild 8 und 9, Abb. 4.17).

Der Körperschwerpunkt befindet sich horizontal betrachtet zum Zeitpunkt des Zwischenminimums noch hinter der Stützstelle, bis etwa das zweite vertikale Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ erreicht ist. Noch vor dem Zeitpunkt des zweiten Kraftmaximums wird der mittlere Stütz erreicht ($\alpha_{Stütz} = 0^\circ$) (siehe Abb. 4.10). Nachdem der Körperschwerpunkt die mittlere Stützstelle überwunden hat, erzeugt der Weitspringer bis zum Zeitpunkt der Beschleunigungsumkehr (bis $F_x = 0$ bzw. $\alpha_{Kraftangriff} = 0^\circ$) Bremskräfte (Bild 13, Abb. 4.17).

Die Schnittstelle von Stützwinkel und Krafrichtungswinkel liegt zeitlich etwa beim Erreichen des horizontalen Kraftmaximums $F_{x,Max}$. Ab ungefähr diesem Zeitpunkt erfolgt die Rotationsumkehr (Bild 15, Abb. 4.17) (siehe auch Abb. 4.10).

Durch den Vergleich der vier Beispiele von kinematischen und dynamischen Zeitverläufen konnte festgestellt werden, dass nach dem Aufprall des Beines innerhalb der ersten 0.02s, wenn die größten Belastungen auf das Sprungbein wirken, bei allen Athleten das Bein kaum beugt, die Steifigkeit des Sprungbeins demnach hier am größten ist. Diese lässt sich über die Kniewinkeländerung gut abschätzen, da der Fuß bis zum Erreichen des kleinsten Kniewinkels gerade noch auf der ganzen Sohle aufsitzt und die Absenkung somit nur über das Kniegelenk erfolgt. Nach dem Abbremsen der vertikalen Geschwindigkeit ($v_{z,KSP} = 0\text{m/s}$), erfolgt ein stärkeres Nachgeben, in dem interindividuelle Unterschiede aber individuell typische Muster zu erkennen sind. Dies betrifft die Kniewinkeländerung und den kleinsten realisierten Kniewinkel in der Beugephase. Anhand der Kniepositionsverläufe und am steigenden Körperschwerpunktsverlauf ist zu erkennen, dass die Beuge-Bewegung durch die rotatorische Bewegung des Sprungbeins um den Fußaufsatz überlagert ist. Sowohl in den Positionsverläufen des Knies und den Kniewinkeländerungen, als auch in den horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderungen des Körperschwerpunkts sind in dieser Phase interindividuelle Unterschiede zu erkennen.

Der kleinste Kniewinkel ist etwa zu dem Zeitpunkt, bei dem das zweite vertikale Kraftmaximum erreicht wird (nach etwa 0.05s), weit nachdem der Körperschwerpunkt seine tiefste Position erreicht hat. Das Lösen des Fußes und die damit beginnende Abdruckbewegung des Fußes findet meist unmittelbar vor dem Erreichen des kleinsten Kniewinkels statt. Da in vertikaler Richtung eine stetige positive Beschleunigung vorliegt, sind mit dem Erreichen des tiefsten Kniewinkels bereits zwei Drittel der

vertikalen Abfluggeschwindigkeit erzeugt. Unterschiede hinsichtlich des vertikalen Geschwindigkeitsgewinns der Streckbewegung des Sprungbeins sind einerseits über unterschiedliche Kniewinkeländerungen des Abdrucks quantifizierbar, andererseits über die Abdruckrichtung und somit über die noch verbleibende Stützzeit (vgl. exemplarisch Abb. 4.8).

Im Folgenden sind die vier Beispiele von zeitlich übereinander gelegten Kraftstößen, Körperschwerpunktverläufen und Kniewinkeländerungen dargestellt (Abb. 4.18: Athlet 2, Abb. 4.19: Athlet 1, Abb. 4.20: Athlet 3, Abb. 4.21: Athlet 4). Die Zeitachsen sind bei allen Sprüngen gleich. Die Stützzeit ist durch die schwarzen Linien gekennzeichnet. Die roten Linien markieren die Bewegungs- und Beschleunigungsumkehr, sowie die Zeitpunkte des vertikalen Kraft-Zwischenminimums, die Kreismarkierungen das zweite Kraftmaximum und den kleinsten Knie- und Hüftwinkel.

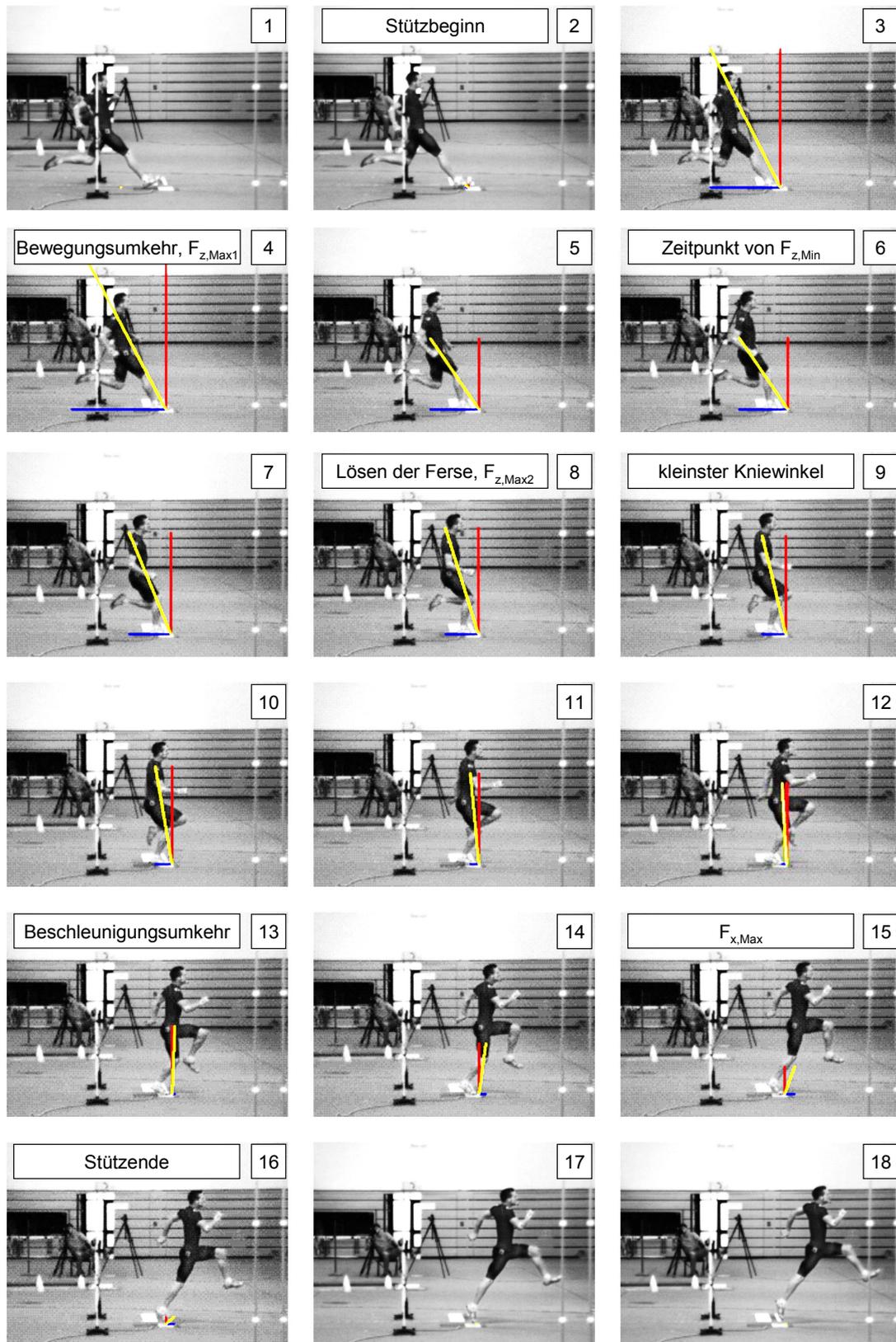


Abb. 4.17: Zeitsynchroner Verlauf der Videobilder und der Beträge der Kraftwirkungslinien mit den wesentlichen Zeitpunkten der Absprungbewegung. Die exakten Zeitpunkte sind nicht immer den Bildern genau zuzuordnen.

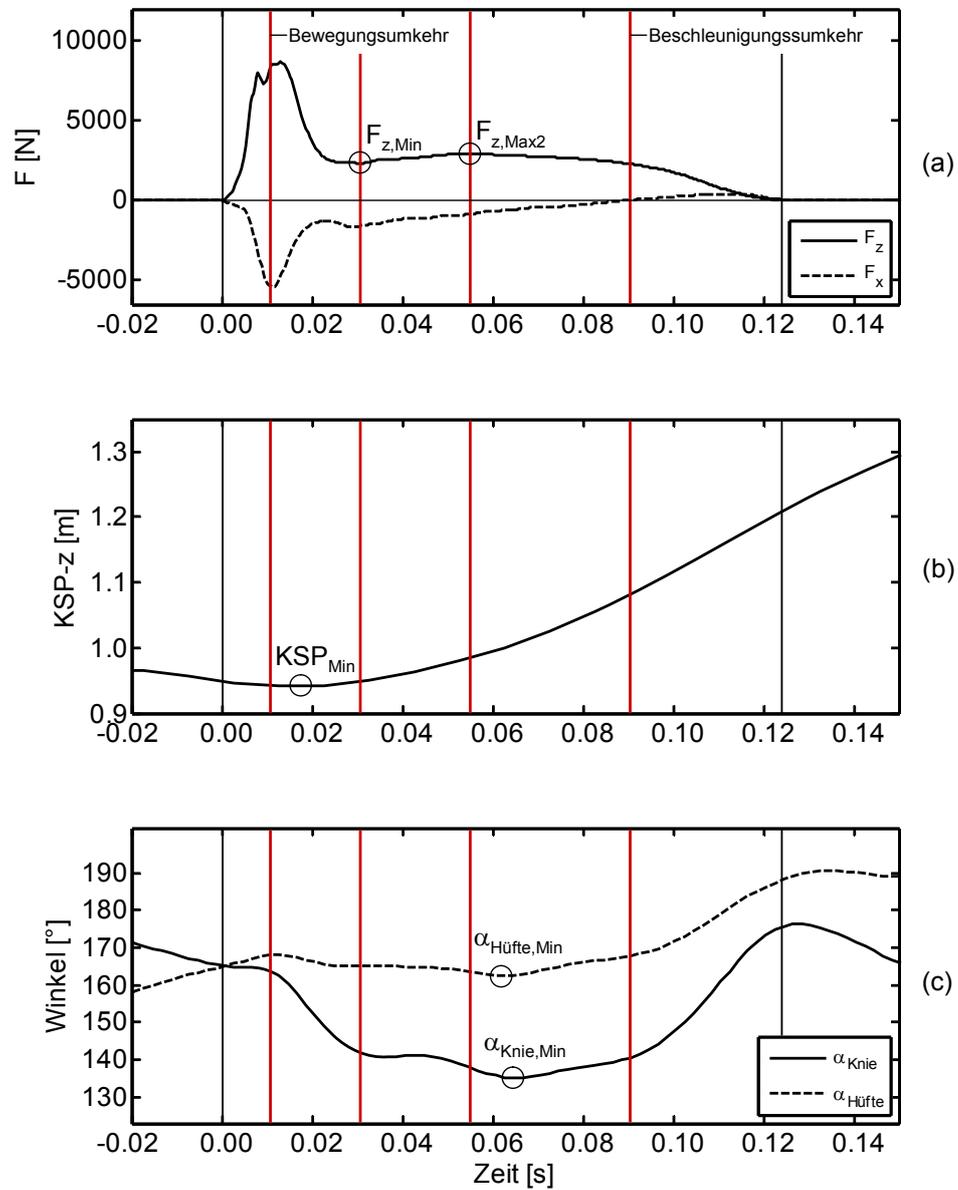


Abb. 4.18: Horizontaler und vertikaler Kraft-Zeit-Verlauf (a), KSP-Verlauf (b) sowie Knie- und Hüftwinkelverlauf α_{Knie} und $\alpha_{Hüfte}$ (c) eines Weitsprunges (Athlet 2) aus dem Wettkampfanlauf.

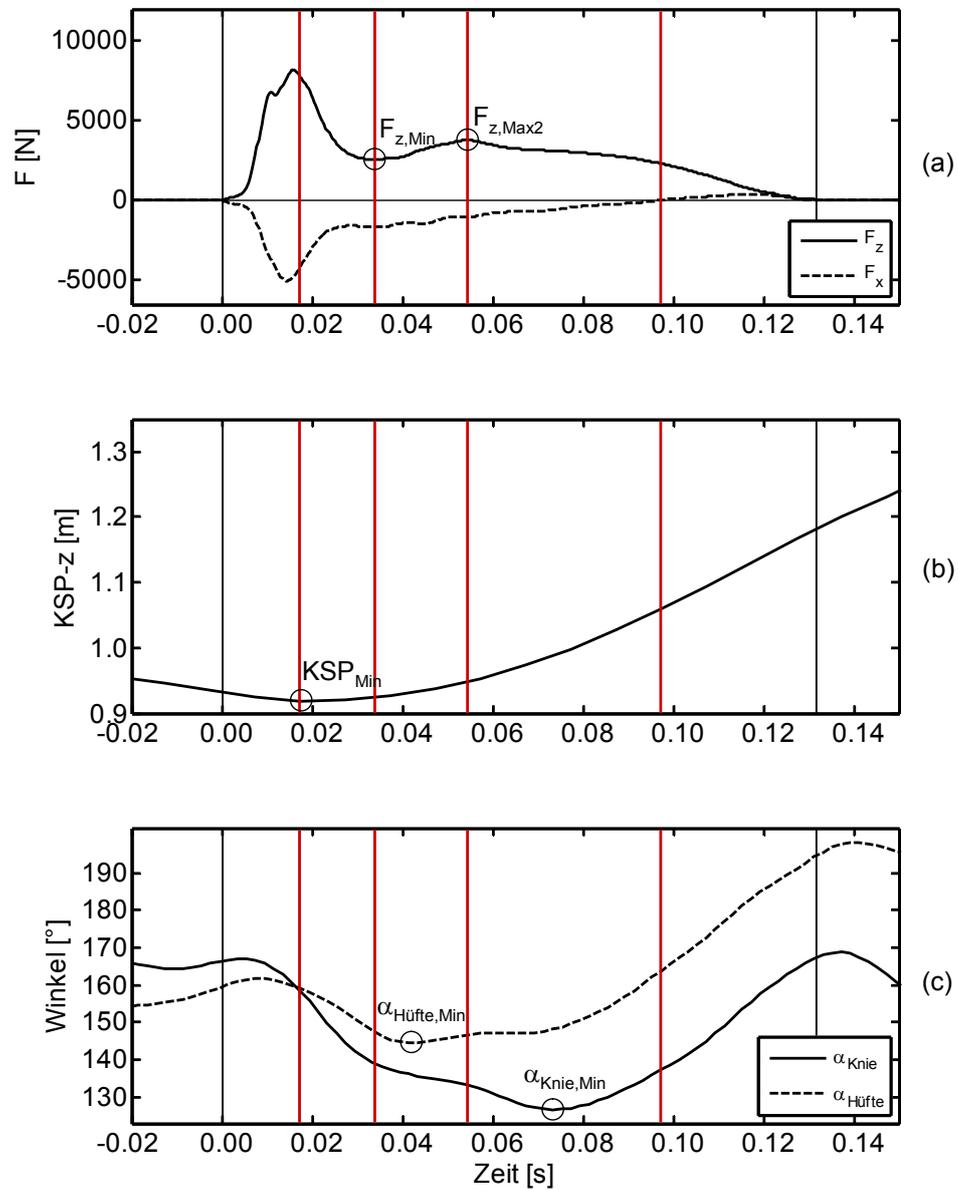


Abb. 4.19: Horizontaler und vertikaler Kraft-Zeit-Verlauf (a), KSP-Verlauf (b) sowie Knie- und Hüftwinkelverlauf α_{Knie} und $\alpha_{Hüfte}$ (c) eines Weitsprungs (Athlet 1) aus dem Wettkampfanlauf.

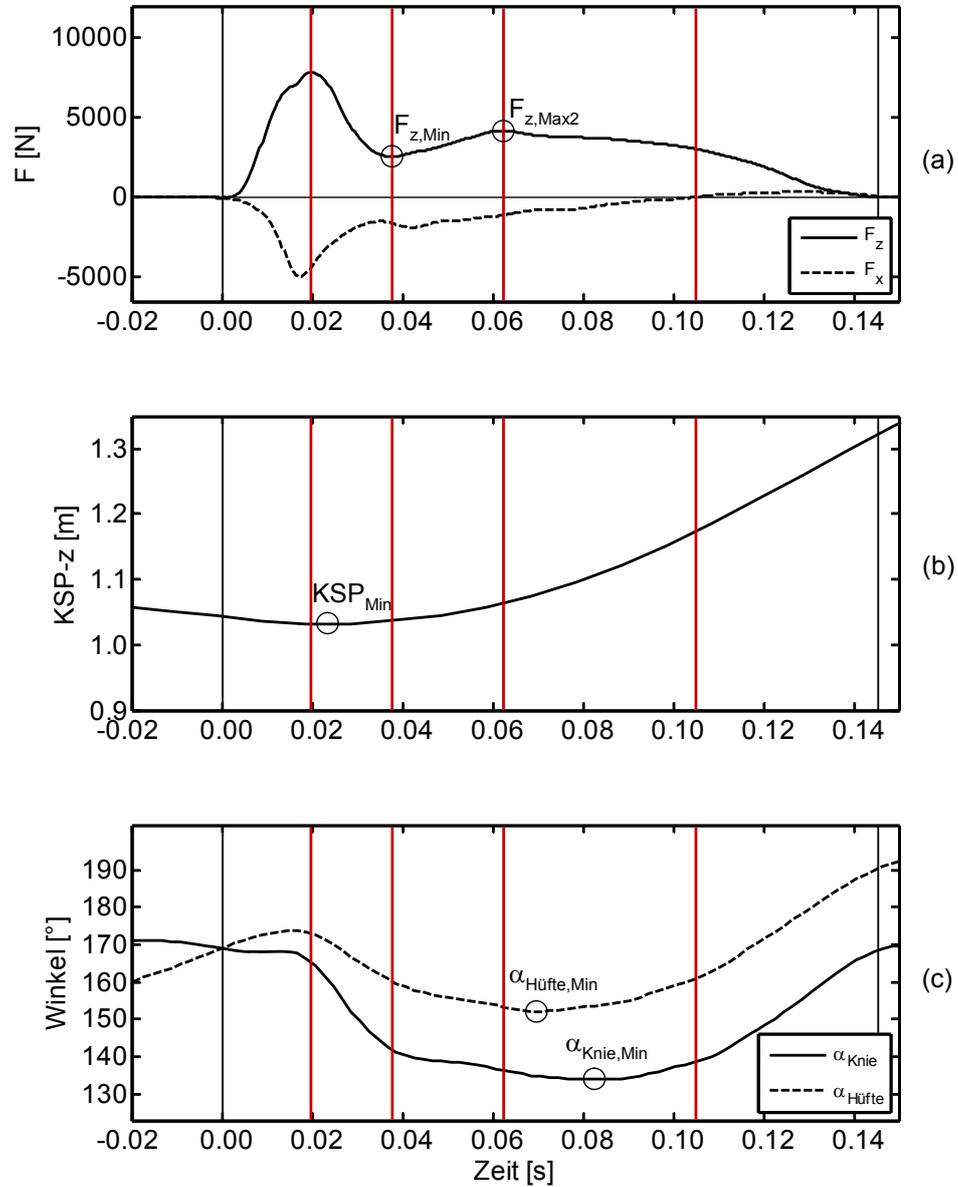


Abb. 4.20: Horizontaler und vertikaler Kraft-Zeit-Verlauf (a), KSP-Verlauf (b) sowie Knie- und Hüftwinkelverlauf α_{Knie} und $\alpha_{Hüfte}$ (c) eines Weitsprunges (Athlet 3) aus dem Wettkampfanlauf.

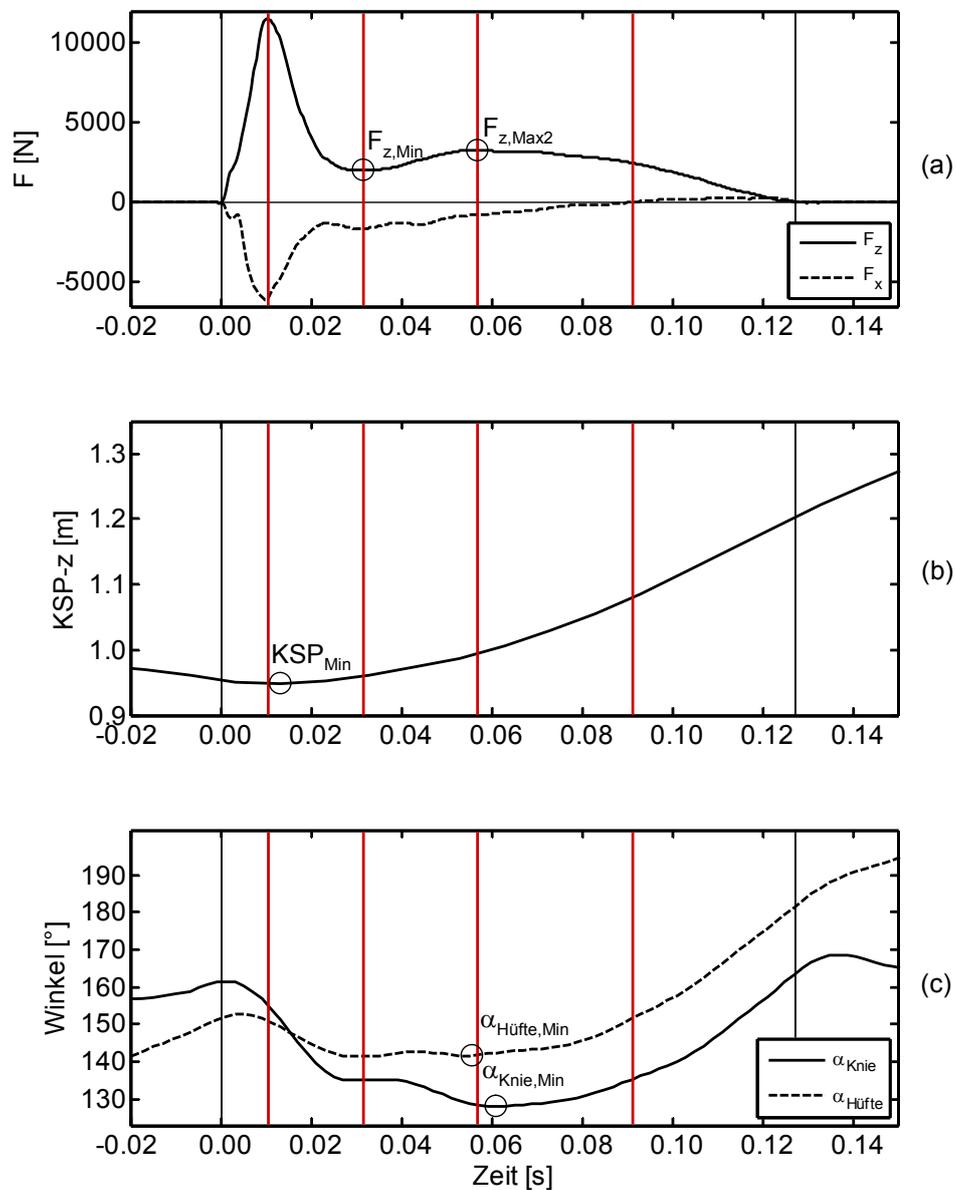


Abb. 4.21: Horizontaler und vertikaler Kraft-Zeit-Verlauf (a), KSP-Verlauf (b) sowie Knie- und Hüftwinkelverlauf α_{Knie} und $\alpha_{Hüfte}$ (c) eines Weitsprungs (Athlet 4) aus dem Wettkampfanlauf.

4.3 Muster im individuellen Absprungverhalten

Kinematische Parameter der Umlenkbewegung

Im intraindividuellen Vergleich lassen sich für die analysierten Absprungbewegungen einige Besonderheiten feststellen. Dies betrifft einerseits die individuell typischen Parameterausprägungen jedes Athleten, andererseits die unterschiedliche Fähigkeit der einzelnen, kinematische Absprungmuster sehr genau zu reproduzieren.

Für zwei Weitspringer (Athlet 1 und 2) wurden zu vier Diagnoseterminen je zwei bis drei Sprünge aus dem Wettkampfanlauf ausgewertet. Ein weiterer Athlet liefert für drei Termine Vergleichswerte mit je zwei Sprüngen. Betrachtet man die Kinematik des Sprungbeins, so ist festzustellen, dass bei allen drei Athleten die Varianzen hinsichtlich der Kniewinkel- und Kniewinkeländerung von Messtermin zu Messtermin unterschiedlich groß sind.

Bei einigen Terminen ist die Streuung der Parameter bei diesen Weitspringern von Messtermin zu Messtermin außerdem so stark ausgeprägt wie innerhalb einer Messeinheit. Dies liegt aber vor allem daran, dass auch weniger gelungene Sprünge der Athleten mit in die Analyse eingingen. So kann die Varianz bestimmter Parameter schon durch einen weniger gelungenen Versuch stark beeinflusst werden. Mit weniger gelungenen Versuchen ist bei derart komplexen Bewegungen immer zu rechnen.

Das bedeutet, dass es zwar Messzeitpunkte gibt, an denen die beispielsweise Kniewinkeländerung weniger streut, was für mehr Steifigkeit des Sprungbeins sprechen würde. Allerdings entsprechen diese Termine nicht den Saisonhöhepunkten, bei denen prinzipiell eine geringere Streuung und eine bessere Leistungsform erwartet werden kann. Auch für die anderen Absprungparameter ist nicht ersichtlich, dass die Kinematik des Absprungs zu bestimmten Messzeitpunkten stabiler ist. Die Streuung unterliegt bei dieser Stichprobe mit dem Umfang hauptsächlich dem Zufall.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass vermeintlich schlechtere Parameterausprägungen (hier als Beispiel die größeren Kniewinkeländerungen) zu ebenso guten Sprungergebnissen führen können und dass die Athleten außerdem innerhalb ihres typischen Absprungmuster auch variabel agieren und bestimmte Merkmalsausprägungen kompensieren können.

Die individuellen Streuungen der Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ betragen beispielsweise innerhalb eines Messtermins bis zu 16.4° (Athlet 1). Bei einem Sprung ist eine vergleichsweise große Kniewinkeländerung von 41.8° gemessen worden. Mit dem

Sprung wurden jedoch immerhin 7.20m erreicht und somit eine größere Weite als bei einen zum gleichen Termin gemessenen Sprung des Athleten mit einer Kniewinkeländerung von nur 25.4° ($W = 6.80\text{m}$).

Für drei andere Springer (Athlet 3, 4, 6), die zu einem Messzeitpunkt je zwei Sprünge aus dem Wettkampfanlauf absolvierten, zeigen sich für die Sprünge sehr ähnlich Absprungmuster (Tab. 4.4). Die Stabilität in der kinematischen Ausprägung (für die Parameter: $\alpha_{Knie,Einstieg}$, $\alpha_{Knie,Min}$, $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$, $\alpha_{Stemmen}$) zu den Zeitpunkten im April und Dezember und könnte somit für einen erfolgreichen Leistungsaufbau und eine stabile Technikausführung sprechen. Bei der zugrundeliegenden Anzahl von Sprüngen kann aber nicht gesagt werden, das diese Athleten prinzipiell mehr Stabilität in ihren Absprungbewegungen nachweisen.

Anhand der Beispiele wird deutlich, dass die Anfangs- und Absprungparameter der Athleten zwar mal mehr und mal weniger streuen, dass sich jedoch nahezu alle Absprungparametern der einzelnen in einem jeweils individuell typischen Bereich befinden, der sich von dem der anderen Athleten abgrenzt. Die zeigen die individuell typischen Anfangspositionen über den Stemmwinkel und den Kniewinkel beim Einstieg in Abb. 4.4 und die Umlenkbewegung über die Kniewinkeländerung in Abb. 4.12 (vgl. Tab. 4.4). Die Vergleiche der Absprungparameter aller Sprünge lassen somit ein Muster im individuellen Umlenkverhalten erkennen. Hinsichtlich der Beschreibung der Umlenkbewegung über den Stemmwinkel, den Kniewinkel beim Einstemmen und die Kniewinkeländerung, bis das Knie seinen kleinsten Winkel einnimmt, können dafür typische Absprungmuster abgeleitet werden.

Dynamischen Parameter der Umlenkbewegung

Beim Betrachten der Kraftstöße der einzelnen Springer zeigt sich darüber hinaus ebenso ein jeweils individuell typischer Kurvenverlauf. Dies betrifft vor allem die Verhältnisse vom ersten Kraftmaximum $F_{z,Max1}$ zum Zwischenminimum $F_{z,Min}$ und zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ im vertikalen Kraftstoß. Der Kraftzuwachs vom Zwischenminimum $F_{z,Min}$ zum zweiten Kraftmaximum $F_{z,Max2}$ ($F_{z,Max2}/F_{z,Min} \cdot 100$) liegt für die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf im Mittel bei $44\% \pm 20\%$. Den größten mittleren Kraftzuwachs erreicht ein Springer mit 76% ($F_{z,Max2}/F_{z,Min} \cdot 100 = 76\% \pm 8\%$). Zwei Springern gelingt ein Kraftzuwachs von 55% und 56% , hingegen erreichen zwei weitere nur einen mittleren Zuwachs von 12% und 21% ($F_{z,Max2}/F_{z,Min} \cdot 100 = 1.21\% \pm 5\%$). Die Standardabweichungen für die relativen Verhältnisse sind sehr klein (von $\pm 2\%$ bis $\pm 4\%$;

ein Messung allerdings mit $\pm 24\%$), was die individuelle Charakteristik im Kurvenverlauf unterstreicht.

Trotz der in den letzten Kapiteln beschriebenen interindividuellen Streuungen der dynamischen Abspruntparameter kann folglich in den Kurvenverläufen der einzelnen Athleten ein relativ stabiles, typisches Muster erkannt werden. Zur Veranschaulichung sind nachfolgend für vier ausgewählte Athleten Kraftstöße ihrer Sprünge dargestellt.

Zunächst zeigt Abb. 4.22 zwei Kraftstöße von zwei Weitspringern, die zu einem Messtermin aufgezeichnet wurden. Der Vergleich der Bodenreaktionskräfte basiert auf annähernd identischen Anlaufgeschwindigkeiten. Entsprechend liegen auch die erreichten Weitsprungweiten nahe beieinander. Die Ähnlichkeit bezüglich der Abspruntparameter ist Tab. 4.12 zu entnehmen.

Tab. 4.12: Abspruntparameter von Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf zweier Weitspringer zu einem Messtermin. Die Parameter beschreiben die Sprünge von Athlet 3 (links) und Athlet 4 (rechts) in Abb. 4.22.

entspricht Abb. 4.22	Athlet 3		Athlet 4	
	oben	unten	oben	unten
W [m]	7.30	7.25	7.00	6.85
v_{LS2} [m/s]	9.75	9.85	9.37	9.52
$v_{z,Einstieg}$ [m/s]	-0.64	-0.64	-0.55	-0.55
$\Delta v_{z,Absprung}$ [m/s]	3.50	3.23	3.35	3.28
$v_{z,Abflug}$ [m/s]	2.86	2.59	2.79	2.74
$v_{x,Einstieg}$ [m/s]	9.56	9.64	9.15	9.26
$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	-1.39	-1.23	-1.24	-1.34
$v_{x,Abflug}$ [m/s]	8.17	8.41	7.91	7.92
α_{Abflug} [°]	20.2	18.0	20.3	20.0
$-S_z$ [Ns]	60	60	45	45
$+S_z$ [Ns]	266	241	231	225
$-S_x$ [Ns]	-140	-129	-110	-119
$+S_x$ [Ns]	10	15	7	9
$F_{z,Max2}/F_{z,Min}$	1.67	1.71	1.35	1.33

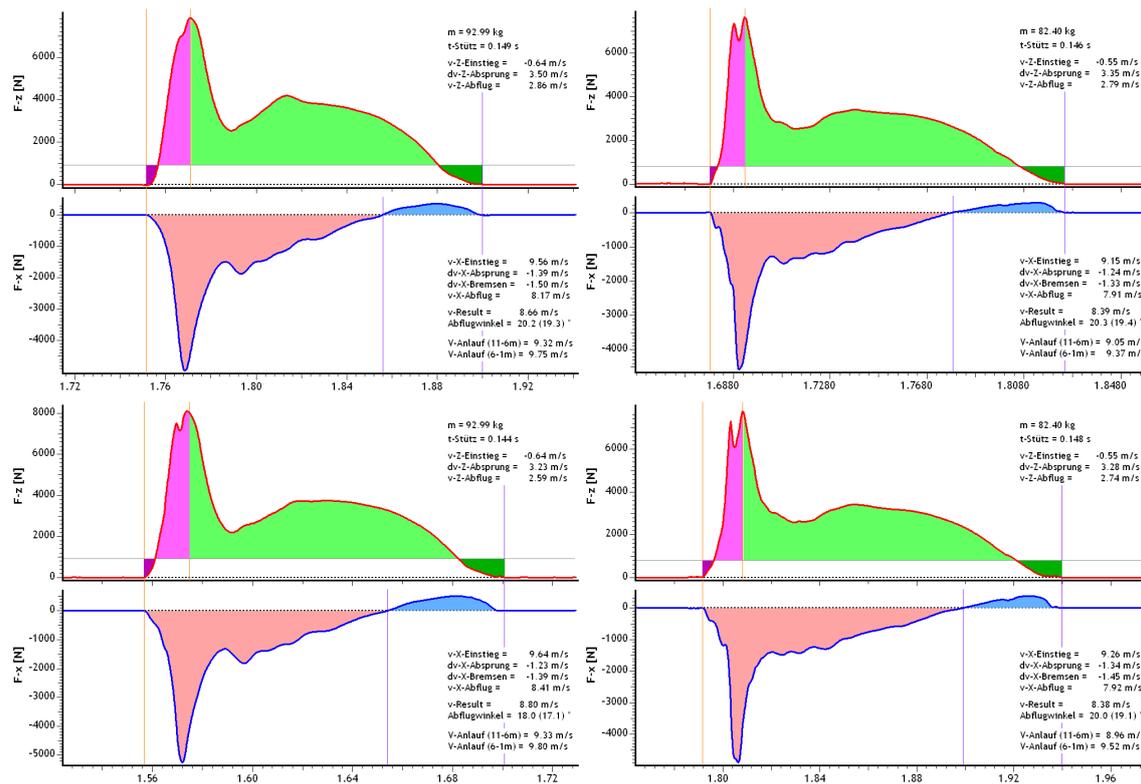


Abb. 4.22: Bodenreaktionskräfte von Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf zweier Weitspringer (links: Athlet 3, rechts: Athlet 4) zu einem Messtermin.

Für die Weitsprünge des Athleten 3 (links) errechnet sich jeweils ein Kraftzuwachs von 67% (oben) und 71% (unten). Während die vertikalen Bremskraftstöße $-S_z$ gleich groß sind, zeigt sich im Sprung oben ein etwas größerer horizontaler Bremsstoß $-S_x$ (bei etwas kleinerem $v_{x,Einstieg}$). Dieser erklärt sich durch das größere horizontale Kraftminimum (oben: $F_{x,Min} = -4380\text{N}$, unten: $F_{x,Min} = -5260\text{N}$). Der horizontale Geschwindigkeitsverlust ist mit 14.5% im oberen Sprung nur etwas größer als der im unteren mit 12.8%. Gleichzeitig ist der vertikale Kraftstoß oben etwas größer (oben: $+S_z = 266\text{Ns}$, unten: $+S_z = 240\text{Ns}$). Durch die größere vertikale Abfluggeschwindigkeit beim oberen Sprung ergibt sich ein um 2° größerer Abflugwinkel.

Bei den Weitsprüngen des Athleten 4 (rechts) sind sowohl die Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$, die vertikalen Bremsstöße $-S_z$, die Abfluggeschwindigkeiten (oben: $v_{ges,Abflug} = 8.39\text{m/s}$, unten: $v_{ges,Abflug} = 8.38\text{m/s}$) als auch der Abflugwinkel α_{Abflug} fast gleich groß. Der Kraftzuwachs unterscheidet sich um 2%. Minimale Unterschiede ergeben sich für den horizontalen Anteil des Kraftstoßes $-S_x$ und den vertikalen Anteil $+S_z$. Der horizontale Geschwindigkeitsverlust ist im oberen Sprung mit 13.6% minimal größer als im unteren mit 14.6%.

Die beiden verglichenen Sprünge erzielten aufgrund geringer (Athlet 3) oder kaum messbarer (Athlet 4) variierender Absprunghparameter nahezu gleiche Sprungweiten und weisen darüber hinaus einen sehr ähnlichen, typbedingten Kurvenverlauf der Bodenreaktionskräfte auf.

Diese Ähnlichkeit lässt vermuten, dass der Charakter der Kurvenverläufe bei Messungen zu einem Termin zum einen von den konstitutionellen Voraussetzungen und dem individuellen Bewegungsmuster, zum anderen aber auch von der Leistungsform des Athleten auf einem hohen Niveau geprägt sind. Da zudem die Anlaufgeschwindigkeiten zu einem Messzeitpunkt in zwei Sprüngen genau reproduziert werden konnten, lassen sich bei ähnlichen kinematischen Anfangsbedingungen schließlich kaum Unterschiede in den Mustern der Bodenreaktionskräfte feststellen.

Um die Leistungsveränderungen anhand der Bodenreaktionskräfte zu veranschaulichen, wurden die Kraftstöße von Sprüngen, die aus der Vorbereitungs- und der Wettkampfphase stammen, für zwei Athleten exemplarisch gegenübergestellt. Um den Entwicklungsverlauf über die Saison hinweg zu vergleichen, wurde ein dritter Sprung aus der darauf folgenden Saison zum Vergleich hinzugezogen.

Abb. 4.23 verdeutlicht die Ähnlichkeit der Kraftstöße einzelner Weitspringer zu den drei über die Saisons verteilten Messzeitpunkten. Die relevanten Absprunghparameter der Sprünge sind dazu in Tab. 4.13 aufgeführt.

Für Athlet 1 (links) wurden Sprünge aus den Messterminen im Januar (zweite Messsaison), April und Juli (dritte Messsaison) und für Athlet 2 (rechts) aus Messterminen im Januar und April (zweite Messsaison) sowie im Dezember (dritte Messsaison) ausgewählt.

Beim Vergleich der drei Kraftstöße der beiden Weitspringer fallen neben der individuellen Prägung im Kraftkurvenverlauf vor allem zwei Dinge auf: Über den Zeitraum von zwei Trainingssaisons lassen sich zum einen Leistungssteigerungen in der Sprungweite feststellen. Zum anderen zeigen sich über die Saisons hinweg für jeden Weitspringer individuell unterschiedliche Entwicklungen bezüglich der leistungsbestimmenden Absprunghparameter (siehe Tab. 4.13).

Tab. 4.13: Absprungparameter von Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf zweier Weitspringer zu verschiedenen Messterminen. Die Parameter beschreiben die Sprünge von Athlet 1 (links) und Athlet 2 (rechts) in Abb. 4.23.

entspricht Abb. 4.22	Athlet 1			Athlet 2		
	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten
W [m]	6.90	7.10	7.45	7.05	7.05	7.25
v_{LS2} [m/s]	9.49	9.86	9.86	9.47	9.53	9.57
$v_{z,Einstieg}$ [m/s]	-0.80	-0.77	-0.64	-0.62	-0.59	-0.50
$\Delta v_{z,Absprung}$ [m/s]	3.74	3.45	3.91	3.35	3.41	3.62
$v_{z,Abflug}$ [m/s]	2.94	2.69	3.27	2.73	2.81	3.12
$v_{x,Einstieg}$ [m/s]	9.58	9.87	9.84	9.45	9.45	9.38
$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	-1.73	-1.38	-1.72	-1.29	-1.19	-1.43
$v_{x,Abflug}$ [m/s]	7.85	8.49	8.12	8.16	8.25	7.94
α_{Abflug} [°]	21.2	18.3	22.8	19.2	19.7	22.3
$-S_z$ [Ns]	57.5	57.0	46.2	41.8	40.6	47.2
$+S_z$ [Ns]	211.4	198.4	236.1	184.6	194.2	199.7
$-S_x$ [Ns]	-130.9	-112.5	-132.1	-93.6	-93.0	-105.2
$+S_x$ [Ns]	6.5	10.4	7.9	6.7	11.0	7.4
$F_{z,Max2}/F_{z,Min}$	1.41	1.70	1.46	1.24	1.24	1.27

Bei Athlet 1 (links) ist ein größerer vertikaler Kraftstoß $+S_z$ sichtbar. Obwohl der horizontale Bremskraftstoß $-S_x$ beim zweiten Sprung geringer ist als im dritten (und im ersten), führt der vertikale Zugewinn und somit der steilere Abflugwinkel bei gleicher Anlaufgeschwindigkeit zu einer größeren Sprungweite. Bei den Sprüngen des Weitspringers rechts (Athlet 2) wird der Entwicklungs- und somit der Weitenzugewinn vom vertikalen Beschleunigungskraftstoß und der schnelleren Anlaufgeschwindigkeit bestimmt. Seine Anlaufgeschwindigkeit steigert sich vom ersten zum dritten Weitsprung.

Vergleicht man den Kurvenverlauf der drei Sprünge von jedem Athleten, zeigen sich trotz unterschiedlicher Absprungparameter für die Sprünge annähernd gleiche relative Zugewinne (außer bei Athlet 1, Mitte).

Entwicklungseffekte sind über einen Zeitraum von zwei oder drei Jahren für verschiedene Parameter zu erwarten. Dass durch die Verbesserung der Leistungsform die Charakteristik des Kraft-Zeit-Verlaufs dennoch sehr ähnlich bleibt, spricht für die Annahme, dass diese von mechanisch-konstitutionellen Einflüssen geprägt ist.

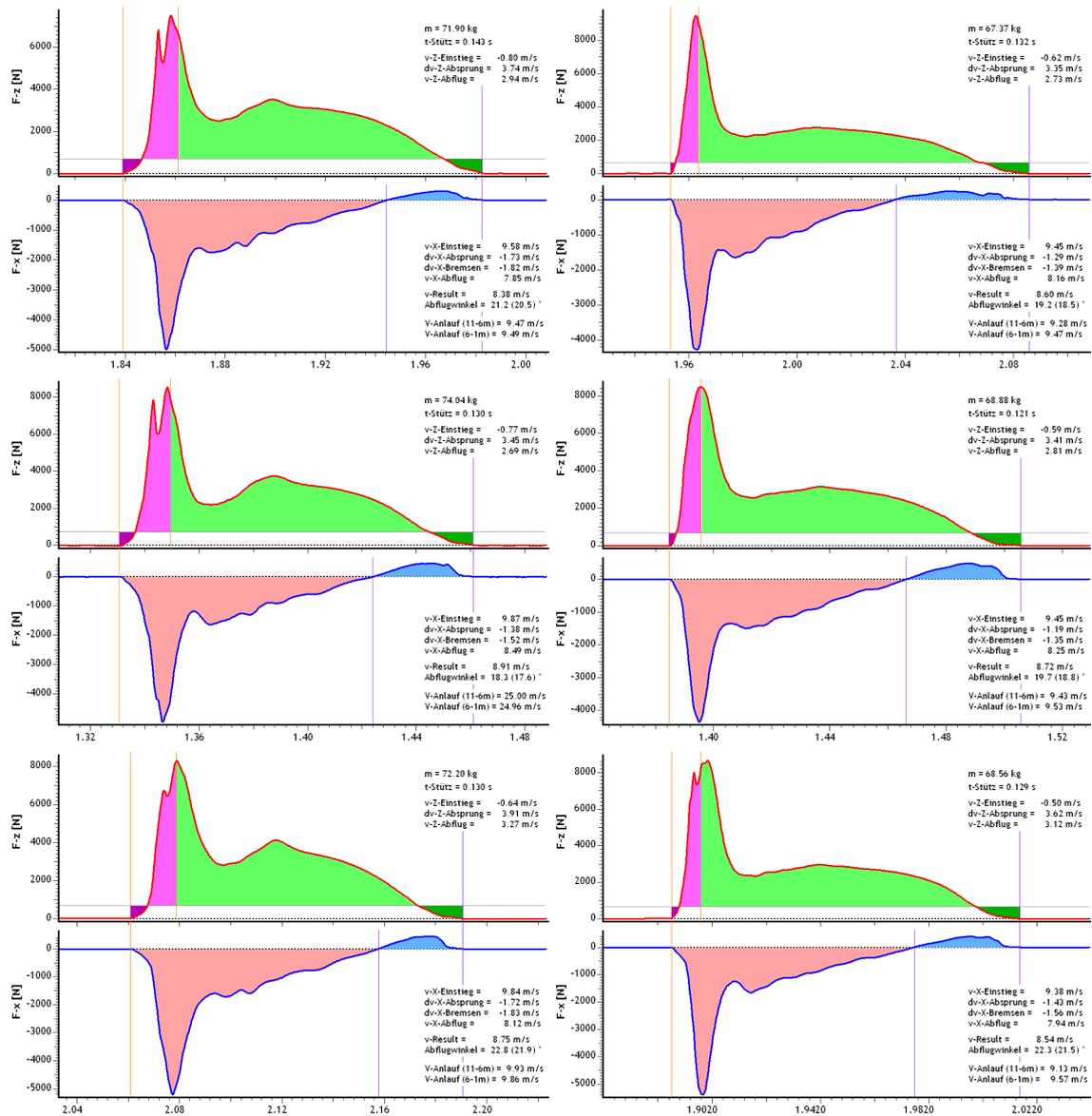


Abb. 4.23: Bodenreaktionskräfte von Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf zweier Weitspringer (links: Athlet 1, rechts: Athlet 2) zu verschiedenen Messterminen.

Wie bisherige Ergebnisse bestätigen, weisen die untersuchten Athleten bezüglich ihrer Absprungparameter jeweils typische Merkmalsausprägungen auf. Diese konnten beispielsweise für die Anfangsgeschwindigkeiten, den Stemmwinkel, den Kniewinkel beim Einstieg und die Kniewinkeländerung festgestellt werden. Da neben der kinematischen Bewegungsausführung auch die Masse über einen Messtermin hinaus relativ unverändert ist, ergibt sich eine individuell typische Form des Kurvenverlaufs. Diese grenzt sich wiederum durch die spezielle Parameterausprägung von anderen Kraft-Zeit-Verläufen ab.

4.4 Abschätzung der theoretischen Sprungweite

Die gemessene effektive Sprungweite W , die die horizontale Distanz zwischen Absprungpunkt und Landestelle misst, ist für diagnostische Zwecke aufschlussreicher als die tatsächlich gesprungenen Weiten, wie sie im Wettkampf gemessen werden. Der Übertritt am Balken oder die vor dem Brett verschenkten Distanzen werden somit nicht berücksichtigt. Die Fehler bei der Landung, die die Weite durch Zurückfallen oder zu frühes Absenken der Beine noch stärker beeinflussen, sind jedoch in der effektiven Sprungweite enthalten.

Die theoretisch erreichbare Weite W_{theor} kann mit der Formel des schrägen Wurfs mit Anfangshöhe (vgl. Formel (13)) abgeschätzt werden. Für den Landeverlust x_L wurde eine Distanz von 20cm eingerechnet. Tab. 4.14 zeigt Mittelwerte sowie die Minimal- und Maximalwerte.

Tab. 4.14: Mittlere effektive Sprungweiten W und theoretische Sprungweiten W_{theor} mit Minima und Maxima sowie die mittlere Differenz aus der effektiven und der theoretischen Sprungweite $W - W_{theor}$ der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

	W [m]	Min und Max von W [m]	W_{theor} [m]	Min und Max von W_{theor} [m]	$W - W_{theor}$ [m]
WkA	7.02 ±0.18	min: 6.80 max: 7.45	7.33 ±0.26	min: 6.67 max: 7.90	-0.31 ±0.18
mA	6.83 ±0.12	min: 6.70 max: 7.15	7.05 ±0.19	min: 6.72 max: 7.41	-0.22 ±0.17

Die effektive Weite der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf unterscheidet sich von der theoretischen im Mittel um $W - W_{theor} = -0.31\text{m}$ (M: $W = 7.02\text{m}$, $W_{theor} = 7.33\text{m}$). Die Abweichung ist hierbei als relativ groß einzuschätzen.

Wenn man die Streuung der Abflugparameter unter dem selben Fokus wie die der Absprungwinkel (siehe Kapitel 4.2.6) betrachtet, stellt sich die Frage, wie sensitiv die vertikalen Abfluggeschwindigkeiten gegenüber der Sprungweite sind. Um der Frage nachzugehen, mit welcher Veränderung der vertikalen Abfluggeschwindigkeiten und somit der Abflugwinkel sich bei konstanten horizontalen Abflugbedingungen die Sprungweite ändert, wurde für den Bereich der aufgezeichneten Weitsprünge ein Wirkungsverhältnis von horizontaler und vertikaler Abfluggeschwindigkeit und damit theoretisch erreichbarer Sprungweite dargestellt.

Werden für die Anfangsbedingungen konstante Werte für die Abflughöhe z_0 , die Abflugpositionsweite x_0 und die horizontale Abfluggeschwindigkeit $v_{x,Abflug}$ sowie den

Landeversatz x_L angenommen, kann für variierende vertikale Abfluggeschwindigkeit $v_{z,Abflug}$ die entsprechende theoretische Sprungweite W_{theor} berechnet werden. Dies erfolgt für die Abflugparameter exemplarisch mit den Mittelwerten der männlichen Kaderathleten, also mit $z_0 = 1.25\text{m}$, $x_0 = 0.45\text{m}$ und $v_{x,Abflug} = 8.06\text{m/s}$ sowie dem Landeversatz $x_L = 0.20\text{m}$ als Konstante. Somit ergeben sich aus der Formel für verschiedene vertikale Abfluggeschwindigkeiten die in Abb. 4.24 entsprechend dargestellten theoretischen Sprungweiten.

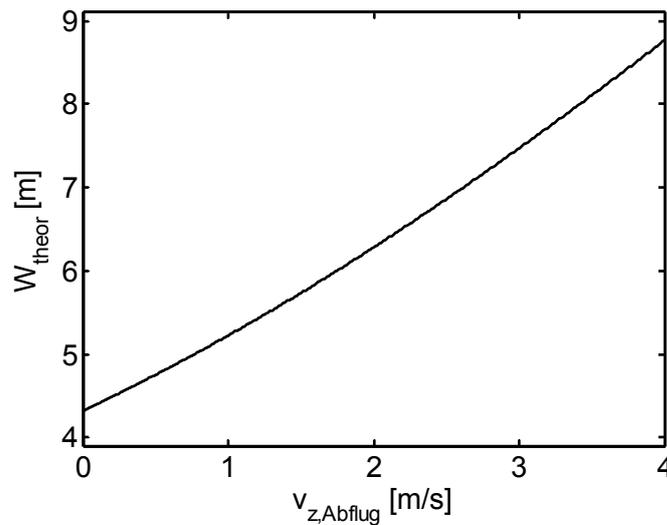


Abb. 4.24: Theoretische Sprungweite W_{theor} berechnet aus der konstanten horizontalen Abfluggeschwindigkeit $v_{x,Abflug} = 8.06\text{m/s}$ und variablen vertikalen Abfluggeschwindigkeiten bei mittleren konstanten Abflugparametern $z_0 = 1.25\text{m}$, $x_0 = 0.45\text{m}$ und dem Landeversatz $x_L = 0.20\text{m}$.

Wenn ein Athlet beispielsweise mit der horizontalen Abfluggeschwindigkeit von $v_{x,Abflug} = 8.06\text{m/s}$ das Absprungbrett verlässt, kann er mit $v_{z,Abflug} = 2.5\text{m/s}$ eine theoretische Sprungweite von $W_{theor} = 6.86\text{m}$ erreichen. Für einen halben Meter mehr an theoretischer Sprungweite (also $W_{theor} = 7.36\text{m}$), muss er in vertikaler Richtung $v_{z,Abflug} = 2.91\text{m/s}$, und somit 0.41m/s mehr Abfluggeschwindigkeit erzeugen. Der Mittelwert der vertikalen Abfluggeschwindigkeit liegt bei $v_{z,Abflug} = 2.84\text{m/s}$. Damit kann mit $v_{x,Abflug} = 8.06\text{m/s}$ eine theoretische Weite von $W_{theor} = 7.27\text{m}$ erreicht werden.

Da in der Realität die vertikale Abfluggeschwindigkeit bei konstanter horizontaler Abfluggeschwindigkeit nicht beliebig gesteigert werden kann, müssen für eine Optimierung beide Parameter berücksichtigt werden. Für die genauere Abschätzung des Wirkungsverhältnisses wurde deshalb zusätzlich mit verschiedenen horizontalen

Abfluggeschwindigkeiten gerechnet. Das Wirkungsverhältnis für beliebige Größen beider Parameter ist für die theoretischen Sprungweiten von 6m bis 9m in Abb. 4.25 abgebildet. Die theoretische Berechnung basiert auf variablen horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeiten und auf den Konstanten $z_0 = 1.25\text{m}$, $x_0 = 0.45\text{m}$ und dem Landeversatz $x_L = 0.20\text{m}$. Die Konstanten ergeben sich ebenfalls aus dem Mittelwert der analysierten Sprünge aus dem Wettkampfanlauf.

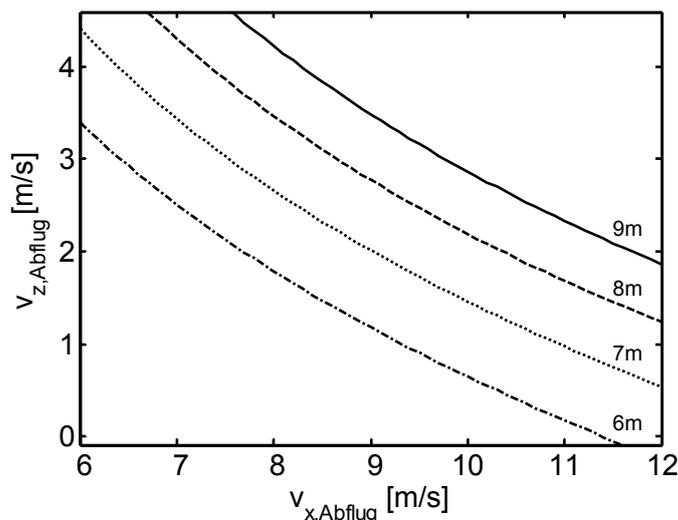


Abb. 4.25: Theoretische Sprungweiten berechnet mit variierenden horizontalen $v_{x,Abflug}$ und vertikalen $v_{z,Abflug}$ Abfluggeschwindigkeiten und mittleren konstanten Abflugparametern $z_0 = 1.25\text{m}$, $x_0 = 0.45\text{m}$ und dem Landeversatz $x_L = 0.20\text{m}$.

Da die Konstanten z_0 und x_0 , als Mittelwerte der aufgezeichneten Sprünge berechnet, damit dennoch von der Körpergröße der Athleten abhängig sind, kann die individuelle theoretische Sprungweite nur bedingt abgeschätzt werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass sowohl Einstiegs- als auch Abflugparameter intraindividuelle Streuungen aufweisen. Das bedeutet, dass ein Athlet bezüglich der Abflugposition von Sprung zu Sprung variiert und somit bei der Annahme einer konstanten Abflughöhe z_0 und Abflugpositionsweite x_0 für die Berechnung der theoretischen Sprungweite immer mit Fehlern zu rechnen ist. Gleiches gilt für den angenommenen Landeverlust von $x_L = 0.20\text{m}$, der auf einem geschätzten Durchschnittswert beruht. Liegen die Abflugbedingungen eines Weitspringers jedoch im Bereich der angegebenen Konstanten, können bei individuellen Analysen der Sprünge sehr wohl Tendenzen und Leistungspotentiale abgeschätzt werden.

In Abb. 4.26 ist der Leistungsbereich der analysierten Weitspringer vergrößert dargestellt. Die theoretische Sprungweite wurde mit den oben beschriebenen Konstanten berechnet und als gestrichelte Linie eingetragen. Darüber hinaus wurden für die verschiedenen Komponenten der horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeit die Abflugwinkel berechnet und als graue Linien in der Grafik dargestellt. Mit der dargestellten Wechselbeziehung der drei Parameter, kann nun einerseits verdeutlicht werden, mit welcher Kombination von Merkmalen letztlich welche Abflugwinkel erreicht werden. Andererseits verdeutlichen die Winkelkennlinien auch, in welchem Spektrum realistische Abflugbedingungen erreicht werden können. Die Weitsprünge der Athleten sind mit den jeweiligen tatsächlichen horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeiten in der Grafik skizziert.

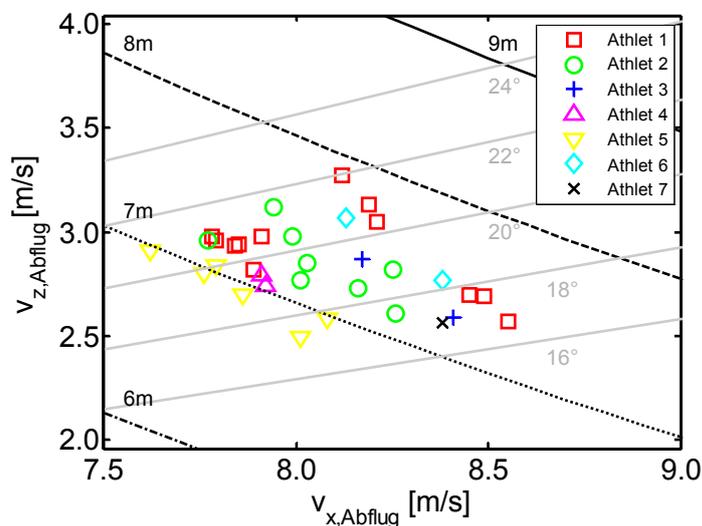


Abb. 4.26: Theoretische Sprungweiten (gestrichelte Linien) aus den unterschiedlichen vertikalen $v_{z,Abflug}$ und horizontalen $v_{x,Abflug}$ Abfluggeschwindigkeiten berechnet mit mittleren konstanten Abflugparametern $z_0 = 1.25\text{m}$, $x_0 = 0.45\text{m}$ und dem Landeversatz $x_L = 0.20\text{m}$. Entsprechend dazu berechnete Abflugwinkel (graue Linien). Darüber dargestellt sind die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf der sieben Athleten.

Die Kennlinien der theoretischen Weite zeigen für die Sprünge in etwa die erreichbare Weite an. Der Unterschied zwischen der Berechnung der theoretischen Sprungweite mit den mittleren Konstanten und der mit den tatsächlich individuell erreichten Abflugparametern z_0 und x_0 liegt im Mittel bei 4cm. Demnach führen die Berechnungen mit konstanter Abflughöhe z_0 und Abflugpositionsweite x_0 nur zu einem relativ geringen Fehler. Bei körperlich großen (Athlet 3 und 4) und kleineren (Athlet 2 und 5)

Weitspringern werden minimal höhere oder tiefere Abflughöhen und Abflugweiten gemessen. Berücksichtigt man die daraus potentiell resultierenden Fehler, weicht die mit mittleren Konstanten berechnete theoretische Sprungweite maximal 17cm von der individuell berechneten ab.

Im Hinblick auf die Bewertung des Absprungsverhaltens kann – veranschaulicht für die Athletengruppe und deren homogenen Leistungsbereich – festgehalten werden, dass eine theoretische Sprungweite von 7m bis 8m durch verschiedene Zusammensetzung der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsanteile erfolgen kann. Die Berechnungen zeigen die theoretischen Möglichkeiten auf.

Inwieweit die Randbereiche auch tatsächlich von den Weitspringern realisierbar sind, kann nur mittels der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Vergleichswerten beantwortet werden. Betrachtet man die mittleren vertikalen Abfluggeschwindigkeiten von $v_{z,Abflug} = 3.41\text{m/s}$ bei WM-Endkämpfen (Müller & Brüggemann, 1998), lässt sich abschätzen, wo zunächst die Grenzen für die vertikale Abflugkomponente liegen.

In welchem Bereich maximale vertikale und horizontale Abfluggeschwindigkeiten liegen können, lässt sich durch die gemessenen Gesamtabfluggeschwindigkeiten (mit etwa $v_{ges,Abflug} = 10\text{m/s}$) der besten Weitspringer (siehe Tab. 2.4) und deren berechneten Abflugwinkel (α_{Abflug} : 18.3° bis 23.2°) abschätzen. Den Ergebnissen zufolge gelang es den 8.90m-Springern mit vertikalen Abfluggeschwindigkeiten von $v_{z,Abflug}$: 3.2m/s bis 3.9m/s und mit horizontalen von Abfluggeschwindigkeiten von $v_{x,Abflug}$: 9.0m/s bis 9.6 m/s abzufliegen.

Für genauere Abschätzungen der maximal möglichen Wettkampfleistungen könnte die theoretische Weitenberechnung auch von einem geringeren Landeverlust ausgehen.

4.5 Effektivität der Umlenkbewegung

4.5.1 Quotient zur Gütebestimmung

Das Umlenkverhalten ist in erster Linie geprägt von den in der Absprungphase wirkenden Kräften, von den Anfangsbedingungen und letztlich auch von der Konstitution des Athleten. Dies belegen die Ergebnisse in Kapitel 4.2. Um die Qualität des Umlenkens der Anlaufgeschwindigkeit in die Abfluggeschwindigkeit quantifizierbar zu machen, müssen jene Parameter betrachtet werden, die eine große horizontale Abfluggeschwindigkeit sowie einen großen Zugewinn der vertikalen Abfluggeschwindigkeit verursachen. Da aufgrund der Komplexität der Absprungbewegung keine eindeutige Priorisierung der leistungsbestimmenden Bewegungsmerkmale in dieser Phase möglich ist, das heißt keine Ordnung interner Beziehungen bezüglich der Absprungparameter erstellt werden kann (vgl. Letzelter, 1983), kann die Qualitätsbestimmung nur auf übergeordneter Ebene erfolgen.

Ein gelungener Sprung zeichnet sich dadurch aus, dass die horizontale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$, sprich der Bremsanteil $\Delta v_{x, \text{Bremsen}}$, so klein wie möglich ausfällt. Gleichzeitig sollte die vertikale Abfluggeschwindigkeit $v_{z, \text{Abflug}}$ bei gegebener Anlaufgeschwindigkeit möglichst groß sein.

Die individuelle Qualität des Umlenkens lässt sich demnach durch die Relation der vertikalen Abfluggeschwindigkeit $v_{z, \text{Abflug}}$ und der beim Absprung erzeugten Änderung der Horizontalgeschwindigkeit $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ charakterisieren. Dafür wurde ein Quotient Q_{Absprung} zur Bewertung definiert.

$$Q_{\text{Absprung}} = \frac{v_{z, \text{Abflug}}}{|\Delta v_{x, \text{Absprung}}|} \quad (9)$$

Der Quotient wächst mit ansteigender vertikaler Abfluggeschwindigkeit $v_{z, \text{Abflug}}$ sowie mit kleineren Beträgen der horizontalen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ oder unter beiden Bedingungen. Je größer der Quotient, desto effektiver ist prinzipiell das Umlenkverhalten eines Weitsprungs zu bewerten.

Bei den Weitsprüngen der männlichen Springer aus dem Wettkampfanlauf streuen die Quotienten im Bereich von 1.68 und 2.64. Für die berücksichtigten Sprünge liegt der mittlere Quotient bei 2.06 ± 0.20 .

Für die Interpretation muss beachtet werden, dass der Quotient zwar die zwei zentralen Aspekte der Umlenkbewegung bewertet, er jedoch nicht die Anlaufgeschwindigkeit

berücksichtigt. Somit zeigen sich in den Ergebnissen, dass die Sprünge mit der größten Weite W nicht denjenigen entsprechen, die auch mit einem großen Quotienten bewertet wurden.

4.5.2 Individuelle Ausprägung der Absprungquotienten

In den vorangegangenen Kapiteln wurden bereits interindividuelle Unterschiede bezüglich der vertikalen Abfluggeschwindigkeit und dem horizontalen Geschwindigkeitsverlust gezeigt. Über den Quotienten $Q_{Absprung}$ wird nun das Verhältnis der beiden Parameter ausgedrückt, das von den beschriebenen Umlenkbewegungen geprägt ist. Wie in Abb. 4.27 zu erkennen ist, finden sich die Athleten in einem bestimmten Größenbereich des Quotienten wieder. Das bedeutet, dass durch das Verhältnis von vertikal erzeugter Abfluggeschwindigkeit und horizontalem Geschwindigkeitsverlust der individuelle Charakter der Absprungbewegungen, unabhängig von der erzielten Weite, beschrieben wird und außerdem die Sprünge der jeweiligen Athleten eine unterschiedliche Effektivität in der Umlenkbewegung aufweisen.

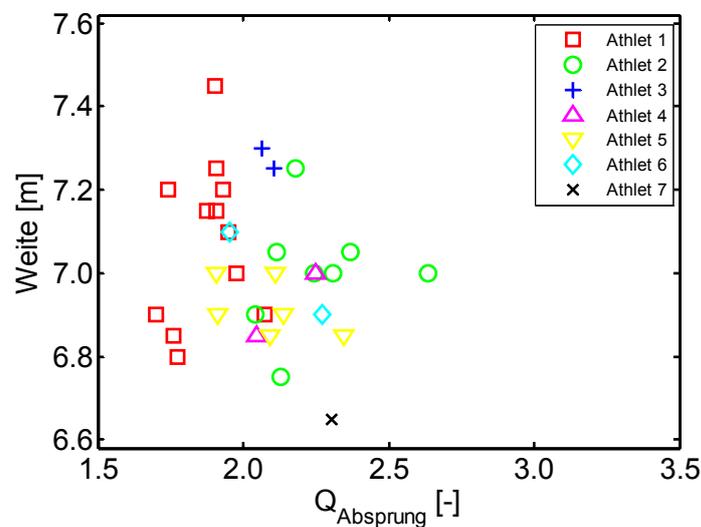


Abb. 4.27: Quotient zur Bestimmung der Absprungqualität $Q_{Absprung}$ in Abhängigkeit der effektiven Sprungweite W bei Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf.

Beispielsweise wurde mit dem größten Quotienten von 2.64 (siehe Abb. 4.27: Athlet 2) eine Sprungweite von 7.00m erreicht. In horizontaler Richtung wurde die Anfangsgeschwindigkeit von $v_{x,Einstieg} = 9.25\text{m/s}$ auf $v_{x,Abflug} = 8.26\text{m/s}$ gebremst. Der

Geschwindigkeitsverlust betrug so lediglich 10.7%. Dies ist mit $\Delta v_{x,Bremsen} = -1.15\text{m/s}$ ($\Delta v_{x,Absprung} = -0.99\text{m/s}$) gleichzeitig der kleinste horizontale Bremsanteil aller Sprünge aus dem langen Anlauf. In vertikaler Richtung wurde mit nur 3.22m/s wenig Geschwindigkeit dazu gewonnen, was einem kleinen Abflugwinkel von 18.3° entspricht. Der Kniewinkel wurde jedoch im tiefsten Punkt $\alpha_{Knie,min}$ nur auf 134.8° gebeugt, womit auch die Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ mit 23.7° unterdurchschnittlich klein ist. Der Absprung erfolgt über ein relativ steifes Sprungbein.

Quotienten um den Wert 2.3 zeigen ähnliche Absprungcharakteristiken. Die Weitsprünge kennzeichnet tendenziell eine große Gesamtabfluggeschwindigkeit, bei verhältnismäßig geringer horizontaler Geschwindigkeitsänderung. Einige Beispiele sind Tab. 4.15 zu entnehmen. Die Quotienten in diesem Bereich gehen hauptsächlich auf Athlet 2, 4, 5 und 6 zurück (Abb. 4.27).

Tab. 4.15: Beispiele für große Quotienten $Q_{Absprung}$ aus dem Bereich von 2.64 bis 2.31 der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf.

$Q_{Absprung}$ [-]	$v_{z,Abflug}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	$v_{x,Einstieg}$ [m/s]	$v_{z,Einstieg}$ [m/s]	$v_{x,Abflug}$ [m/s]	$\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ [°]	Athlet
2.64	2.61	-0.99	9.25	-0.62	8.26	23.7	2
2.37	2.82	-1.19	9.54	-0.59	8.25	25.1	2
2.35	2.58	-1.10	9.18	-0.59	8.08	26.9	5
2.31	2.98	-1.29	9.28	-0.38	7.99	25.3	2

Der im Vergleich kleinste Quotient ($Q_{Absprung} = 1.70$) wurde bei einem 6.90m Sprung mit einer horizontalen Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg} = 9.58\text{m/s}$ errechnet. Im horizontalen Bremsanteil $\Delta v_{x,Bremsen}$ ist eine sehr große Geschwindigkeitsänderung von -1.82m/s zu beobachten, dies entspricht einer Geschwindigkeitsreduktion von 18.1%. In vertikale Richtung werden dafür $\Delta v_{z,Absprung} = 3.74\text{m/s}$ dazugewonnen, was immerhin noch deutlich über dem Durchschnitt von 3.48m/s für die vertikale Geschwindigkeitsänderung liegt. Die Beugung des Knies ist im tiefsten Punkt mit 123.4° und einer Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ von 42.8° ebenfalls überdurchschnittlich ausgeprägt. Abweichungen vom Mittelwert in Bezug auf den tiefsten Kniewinkel $\alpha_{Knie,min}$ liegen bei 10° . Die Sprungweite ergibt sich folglich durch eine ausgeprägte Beuge-Streckbewegung im Sprungbein, welche die vertikale Abfluggeschwindigkeit ermöglicht, die horizontale Anfangsgeschwindigkeit jedoch stark reduziert.

Insgesamt sind bei den kleineren Quotienten ähnliche Tendenzen der Parameterausprägung erkennbar. Dies erklärt sich primär daraus, dass die Werte

vornehmlich von einem Springer (Athlet 1) stammen, der sich durch dieses Absprungsverhalten charakterisiert (siehe Tab. 4.16).

Tab. 4.16: Beispiele für kleine Quotienten $Q_{Absprung}$ aus dem Bereich von 1.70 bis 1.78 der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf.

$Q_{Absprung}$ [-]	$v_{z,Abflug}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	$v_{x,Einstieg}$ [m/s]	$v_{z,Einstieg}$ [m/s]	$v_{x,Abflug}$ [m/s]	$\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ [°]	Athlet
1.70	2.94	-1.73	9.58	-0.80	7.85	42.8	1
1.74	2.98	-1.71	9.49	-0.83	7.78	41.8	1
1.76	2.96	-1.68	9.48	-0.82	7.79	41.2	1
1.78	2.93	-1.65	9.49	-0.66	7.84	43.8	1

Quotienten im Bereich des Mittelwerts $Q_{Absprung} = 2.0$ weisen verschiedene Ausprägungen der kinematischen und dynamischen Parameter auf. Grundsätzlich liegen die vertikale Abfluggeschwindigkeit $v_{z,Abflug}$, die horizontale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x,Absprung}$ sowie die Kniewinkel im tiefsten Punkt $\alpha_{Knie,min}$ und die Kniewinkeländerungen $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ im Bereich der jeweiligen Mittelwerte. Die Streuung des Quotienten im mittleren Bereich (von $Q_{Absprung} = 1.8$ bis 2.2) erklärt sich vor allem durch die Unterschiede in der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit, die letztlich die unterschiedlichen Sprungweiten bedingen (siehe Abb. 4.27).

4.6 Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf

Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf werden im Training als Techniksprünge, aber auch als Kontrollsprünge zur Diagnose des Leistungszustandes durchgeführt. Wenn in der speziellen Vorbereitungsphase die Anlaufgeschwindigkeiten der Athleten höher werden und die Kraftwerte langsam steigen, können Techniksprünge aus 12 bis 14 Anlaufschritten im Training eingebaut werden (Hess, 2010). Dabei steht insbesondere die technische Verfeinerung und Spezifizierung der Anlaufgestaltung und der Absprungphase im Fokus. Anhand der technischen Ausführung und der erreichten Sprungweite können dann aus Sicht der Trainer meist erfolgreiche Prognosen über die realisierbaren Wettkampfweiten erstellt werden.

Wie ähnlich sich die Sprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf tatsächlich sind, soll im Folgenden mit zwei Vergleichsansätzen beantwortet werden. Zunächst werden grundsätzlich Norm- und Vergleichswerte für relevante und leistungs-

bestimmende Absprungparameter für alle analysierten Sprünge aus dem mittleren Anlauf vorgestellt. Hierbei werden 45 Sprünge von neun Athleten – analog den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf – grafisch dargestellt. Im zweiten Schritt werden ausgewählte Parameter beider Anlaufweiten von fünf Athleten direkt gegenübergestellt und somit Unterschiede quantifizierbar gemacht.

4.6.1 Vergleich der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf und dem Wettkampfanlauf

Absprungkinematik der Weitsprünge aus den beiden Anlaufweiten

Um eine Vergleichbarkeit der Weitsprünge aus den unterschiedlichen Anlaufweiten herzustellen, sind in Tab. 4.17 die individuellen Mittelwerte der einzelnen Weitspringer und die Gesamtmittelwerte ausgewählter, leistungsbestimmender Absprungparameter für den mittleren Anlauf aufgeführt. Entsprechende Parameter der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf sind Tab. 4.4 zu entnehmen.

Die Stichprobe der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf weist geringere Anfangsgeschwindigkeiten v_{LS2} auf als die der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf ($M_{mA}: v_{LS2} = 8.92\text{m/s} \pm 0.20\text{m/s}$, $M_{WkA}: v_{LS2} = 9.52\text{m/s} \pm 0.21\text{m/s}$). Im Mittel wurden aus dem mittleren Anlauf $W = 6.83\text{m} \pm 0.12\text{m}$ erreicht ($M_{WkA}: W = 7.02\text{m} \pm 0.18\text{m}$). Dennoch zeigen sich für die Sprünge aus den beiden Anlaufweiten bezüglich bestimmter Absprungparameter große Ähnlichkeiten.

Tab. 4.17: Mittelwerte (oberste Zeile), Minimal- und Maximalwerte der Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$, der Kniewinkel beim Aufsatz $\alpha_{Knie,Aufsatz}$, der kleinsten Kniewinkel $\alpha_{Knie,min}$, der Kniewinkel beim Abflug $\alpha_{Knie,Abflug}$ sowie der Kniewinkeländerung beim Beugen $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ und der beim Strecken $\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$ des Sprungbeins der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf.

Athlet	$\alpha_{Stemmen}$ [°]	$\alpha_{Knie,Aufsatz}$ [°]	$\alpha_{Knie,min}$ [°]	$\alpha_{Knie,Abflug}$ [°]	$\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ [°]	$\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$ [°]
1	29.5 ±1.1 min: 27.6 max: 31.4	162.8 ±1.7 min: 159.4 max: 164.4	127.2 ±3.9 min: 121.9 max: 134.3	169.4 ±2.8 min: 164.0 max: 172.8	35.6 ±3.3 min: 29.6 max: 40.9	42.2 ±3.2 min: 38.5 max: 48.8
2	24.2 ±2.0 min: 20.2 max: 27.1	163.7 ±2.3 min: 156.5 max: 164.8	133.9 ±3.2 min: 128.2 max: 137.8	172.3 ±3.9 min: 164.0 max: 177.8	29.9 ±3.0 min: 27.1 max: 33.2	38.4 ±2.2 min: 35.8 max: 42.3
3	27.1 ±2.3 min: 24.5 max: 31.4	168.2 ±1.9 min: 158.5 max: 160.9	135.5 ±3.1 min: 130.0 max: 138.7	173.3 ±2.6 min: 169.0 max: 167.7	32.8 ±3.7 min: 27.4 max: 39.0	37.9 ±1.6 min: 34.9 max: 39.3
4	28.5 ±2.3 min: 26.8 max: 31.1	165.3 ±1.2 min: 164.0 max: 166.5	128.4 ±2.7 min: 125.4 max: 130.5	167.7 ±3.9 min: 163.2 max: 170.1	37.0 ±3.8 min: 33.5 max: 41.1	39.3 ±1.5 min: 37.8 max: 40.8
5	24.4 ±0.7 min: 23.7 max: 24.9	160.3 ±2.8 min: 157.1 max: 163.9	129.0 ±5.7 min: 122.8 max: 137.3	171.7 ±5.1 min: 164.0 max: 177.3	31.3 ±3.0 min: 26.6 max: 34.3	42.7 ±2.5 min: 40.1 max: 46.5
6	21.8 –	170.4 –	145.4 –	178.6 –	25.0 –	33.2 –
7	24.2 ±0.8 min: 23.0 max: 25.2	160.2 ±3.3 min: 156.5 max: 164.8	130.0 ±2.7 min: 126.5 max: 134.0	166.0 ±3.0 min: 162.0 max: 169.4	30.3 ±1.4 min: 27.9 max: 31.2	36.1 ±1.1 min: 35.4 max: 37.9
8	24.6 –	167.4 –	155.5 –	177.6 –	20.2 –	30.4 –
9	21.6 ±2.8 min: 18.3 max: 25.5	157.6 ±2.3 min: 154.9 max: 160.1	144.0 ±6.6 min: 136.9 max: 151.8	159.4 ±4.8 min: 153.7 max: 165.9	30.6 ±4.4 min: 26.2 max: 35.8	32.5 ±2.9 min: 27.8 max: 35.6
M	25.5 ±3.1	163.0 ±3.8	131.2 ±5.9	169.7 ±5.6	31.9 ±4.4	38.5 ±4.1

Für die abgeschätzte Struktureinteilung der Stemmpositionen – die Verhältnisse von Stemmwinkel und Kniewinkel beim Aufsatz – zeigen sich bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf (siehe Abb. 4.28) für die einzelnen Athleten ähnliche Kombinationen wie bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf (siehe Abb. 4.4). Auch hier finden sich die Parameter der Sprünge der einzelnen Athleten in bestimmten Bereichen wieder. Diese individuellen Streubereiche stimmen größtenteils mit denen der Sprünge aus dem

Wettkampfanlauf überein. Abweichungen vom individuellen Muster zeigen sich bei einem Weitspringer (Athlet 1), der bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf beim Auftreffen das Sprungbein mit kleineren Winkeln $\alpha_{Knie,Aufsatz}$ aufsetzt. Er stemmt jedoch mit gleichem Winkel $\alpha_{Stemmen}$. Die Werte von Athlet 9, für den keine Sprünge aus dem Wettkampfanlauf vorliegen, liegen im Bereich des engen Stemmens (kleinem $\alpha_{Stemmen}$) mit überdurchschnittlich großer Sprungbeinbeugung beim Aufsatz (kleinem $\alpha_{Knie,Aufsatz}$). Demnach ist seine Körperschwerpunktage beim Auftreffen etwas tiefer.

Da für die Sprünge aus dem mittleren Anlauf mehr Versuche vorliegen, ist die Verteilung auf die Winkelkombinationen etwas ausgewogener als bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf.

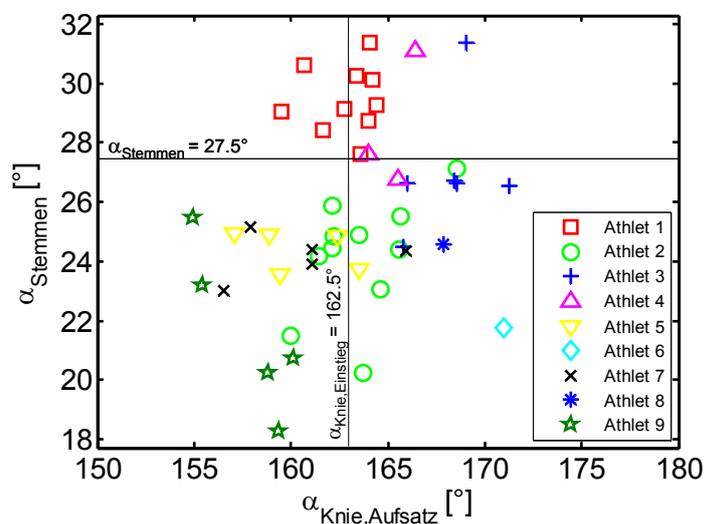


Abb. 4.28: Verhältnisse von Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$ und Kniewinkel beim Einstieg $\alpha_{Knie,Aufsatz}$ der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf.

Die Kniewinkeländerung vom Auftreffen bis zum kleinsten Kniewinkel sind bei Sprüngen aus dem mittleren Anlauf ähnlich ausgeprägt wie beim Wettkampfanlauf. Dies spiegelt sich in der Gesamtgegenüberstellung der Sprünge in Abb. 4.29 oben wider ($M_{mA}: \Delta\alpha_{Knie,Beugen} = 31.9^\circ \pm 4.4^\circ$, $M_{WkA}: \Delta\alpha_{Knie,Beugen} = 32.2^\circ \pm 5.8^\circ$). Die einzelnen Weitspringer zeigen bei den Sprüngen aus dem mittlerern Anlauf typische individuelle Parameterausprägungen für den Stemmwinkel. Entsprechend den Anlaufgeschwindigkeiten v_{LS2} sind die horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten der Sprünge aus dem mittleren Anlauf langsamer als die aus dem Wettkampfanlauf ($M_{mA}: v_{x,Einstieg} = 8.97\text{m/s} \pm 0.23$, $M_{WkA}: v_{x,Einstieg} = 9.45\text{m/s} \pm 0.25\text{m/s}$), was Abb. 4.29 unten verdeutlicht.

Tendenziell ist bei einigen Athleten bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf eine etwas größere Beuge-Streckbewegung zu erkennen. Athlet 1 fällt bei beiden Anlaufdistanzen bezüglich seiner größeren Kniewinkeländerungen und weitem Stemmen auf, Athlet 9 wegen seinem gebeugten Sprungbein beim Aufsatz bei kleinem Stemmwinkel.

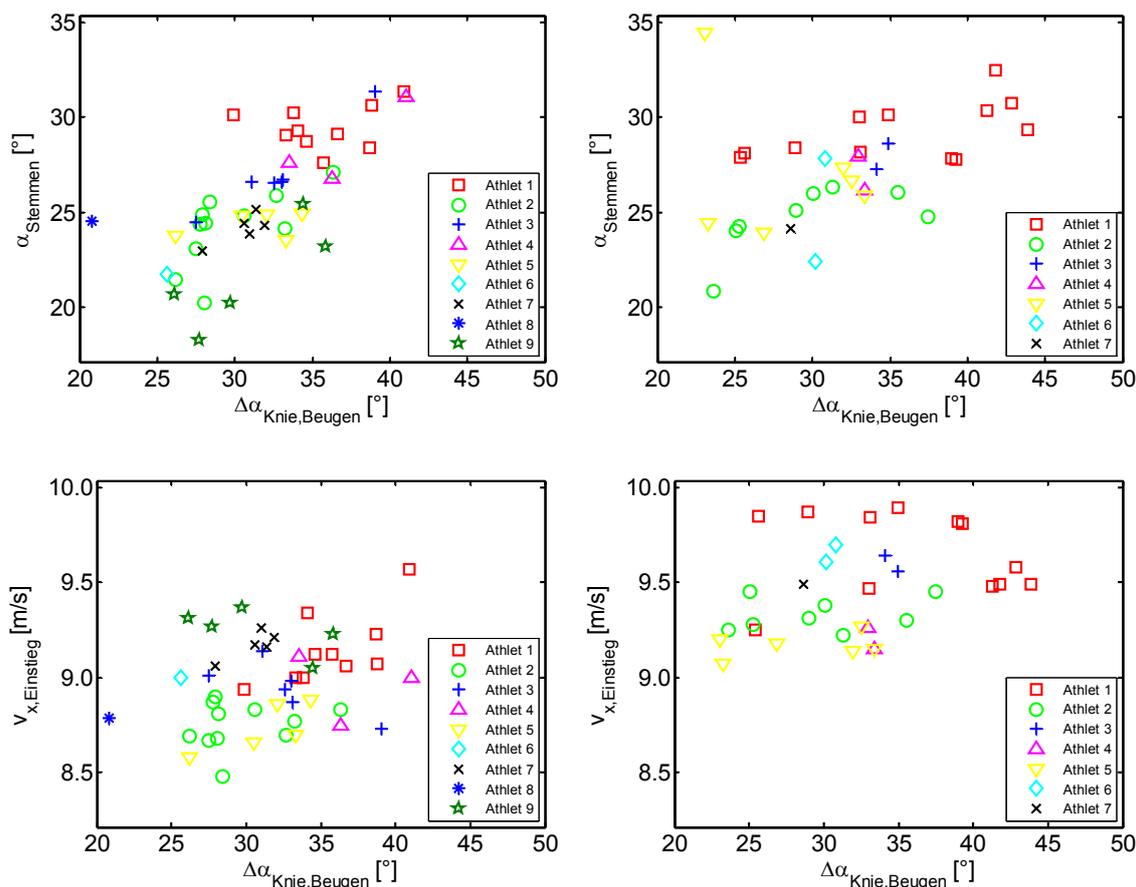


Abb. 4.29: Vergleich von Stemmwinkel α_{Stemmen} und Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{\text{Knie,Beugen}}$ (oben) sowie von horizontaler Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,\text{Einstieg}}$ und Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{\text{Knie,Beugen}}$ (unten) beim mittleren (links) und Wettkampfanlauf (rechts).

Geschwindigkeitsänderungen der Weitsprünge aus den beiden Anlaufdistanzen

Die horizontalen Geschwindigkeitsänderungen des mittleren Anlaufs liegen im Mittel bei $\Delta v_{x,\text{Abflug}} = -1.28\text{m/s} \pm 0.26\text{m/s}$ und sind somit um etwa 0.10m/s kleiner als die des Wettkampfanlaufs ($\Delta v_{x,\text{Abflug}} = -1.39\text{m/s} \pm 0.20\text{m/s}$). Beide Stichproben unterscheiden sich bezüglich der mittleren prozentualen horizontalen Geschwindigkeitsverluste (beide $v_{x,\text{Verlust}} = 14\%$) nicht voneinander. Die vertikale Geschwindigkeitsänderung der Sprünge aus dem mittleren Anlauf beträgt $\Delta v_{z,\text{Abflug}} = 3.46\text{m/s} \pm 0.31\text{m/s}$. Der Stichproben-

mittelwert ist dem Mittelwert der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf ebenfalls ähnlich ($\Delta v_{z,Abflug} = 3.48\text{m/s} \pm 0.23\text{m/s}$).

Tab. 4.18 listet die Brems- und Beschleunigungsanteile der Geschwindigkeitsänderungen aller Athleten für den mittleren Anlauf im Vergleich zu denen der Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf in Tab. 4.8.

Tab. 4.18: Mittelwerte (oberste Zeile), Minimal- und Maximalwerte der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x,Absprung}$, $\Delta v_{z,Absprung}$ mit den horizontalen Brems- und Beschleunigungsanteilen $\Delta v_{x,Bremsen}$, $\Delta v_{x,Beschl}$ und den vertikalen Brems- und Beschleunigungsanteilen $\Delta v_{z,Bremsen}$, $\Delta v_{z,Beschl}$ der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf.

Athlet	$\Delta v_{x,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{x,Beschl}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Absprung}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Bremsen}$ [m/s]	$\Delta v_{z,Beschl}$ [m/s]	α_{Abflug} [°]
1	-1.59 ±0.08 min: -1.49 max: -1.77	-1.70 ±0.08 min: -1.61 max: -1.86	0.11 ±0.01 min: 0.09 max: 0.12	3.82 ±0.08 min: 3.71 max: 3.95	0.82 ±0.13 min: 0.66 max: 1.06	3.00 ±0.14 min: 2.79 max: 3.26	22.5 ±1.2 min: 20.3 max: 24.4
2	-1.25 ±0.20 min: -0.86 max: -1.53	-1.38 ±0.19 min: -1.02 max: -1.65	0.13 ±0.02 min: 0.09 max: 0.16	3.47 ±0.24 min: 2.94 max: 3.76	0.48 ±0.08 min: 0.32 max: 0.62	2.99 ±0.24 min: 2.60 max: 3.29	22.6 ±2.1 min: 19.3 max: 25.2
3	-1.22 ±0.15 min: -1.01 max: -1.46	-1.35 ±0.15 min: -1.13 max: -1.57	0.13 ±0.01 min: 0.11 max: 0.15	3.38 ±0.10 min: 3.27 max: 3.51	0.60 ±0.12 min: 0.47 max: 0.80	2.79 ±0.18 min: 2.47 max: 2.99	20.7 ±1.8 min: 18.0 max: 23.3
4	-1.52 ±0.22 min: -1.28 max: -1.70	-1.61 ±0.21 min: -1.38 max: -1.78	0.10 ±0.02 min: 0.08 max: 0.11	3.66 ±0.32 min: 3.29 max: 3.86	0.74 ±0.21 min: 0.52 max: 0.94	2.93 ±0.16 min: 2.77 max: 3.08	22.3 ±0.9 min: 21.3 max: 23.0
5	-1.19 ±0.21 min: -0.83 max: -1.37	-1.31 ±0.18 min: -1.01 max: -1.49	0.13 ±0.04 min: 0.08 max: 0.18	3.44 ±0.23 min: 3.09 max: 3.74	0.61 ±0.13 min: 0.47 max: 0.77	2.83 ±0.16 min: 2.61 max: 2.99	21.3 ±1.3 min: 19.4 max: 22.9
6	-1.02 –	-1.17 –	0.15 –	3.35 –	0.63 –	2.71 –	19.5 –
7	-1.20 ±0.07 min: -1.11 max: -1.31	-1.33 ±0.07 min: -1.25 max: -1.43	0.13 ±0.01 min: 0.12 max: 0.14	3.24 ±0.08 min: 3.15 max: 3.32	0.35 ±0.04 min: 0.30 max: 0.39	2.89 ±0.05 min: 2.85 max: 2.94	20.7 ±0.4 min: 20.3 max: 21.3
8	-1.35 –	-1.46 –	0.11 –	3.57 –	0.65 –	2.92 –	23.0 –
9	-0.86 ±0.09 min: -0.74 max: -0.97	-1.06 ±0.07 min: -0.97 max: -1.17	0.20 ±0.03 min: 0.17 max: 0.23	2.89 ±0.06 min: 2.83 max: 2.97	0.54 ±0.10 min: 0.43 max: 0.65	2.35 ±0.04 min: 2.30 max: 2.41	16.5 ±0.5 min: 15.9 max: 17.2
M	-1.28 ±0.26	-1.41 ±0.23	0.13 ±0.04	3.46 ±0.31	0.60 ±0.18	2.86 ±0.25	21.3 ±2.3

Auffallend ist beim Vergleich der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderungen der einzelnen Athleten, dass (wie auch bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf) einige Springer ihre Weite durch größere vertikale Geschwindigkeitsgewinne erreichen und dabei größere Bremsseffekte erzeugen (Athlet 1, 2 und 4). Andere (wie Athlet 9) bremsen die horizontale Geschwindigkeit kaum ab, erreichen allerdings auch wenig vertikale Abfluggeschwindigkeit.

Für die Sprünge aus dem mittleren Anlauf zeigt sich, wie auch bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf, ein negativer Zusammenhang zwischen dem horizontalen Bremsen $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ und dem vertikalen Beschleunigen $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ mit $r = -0.950^{**}$, der in Abb. 4.30 dargestellt ist.

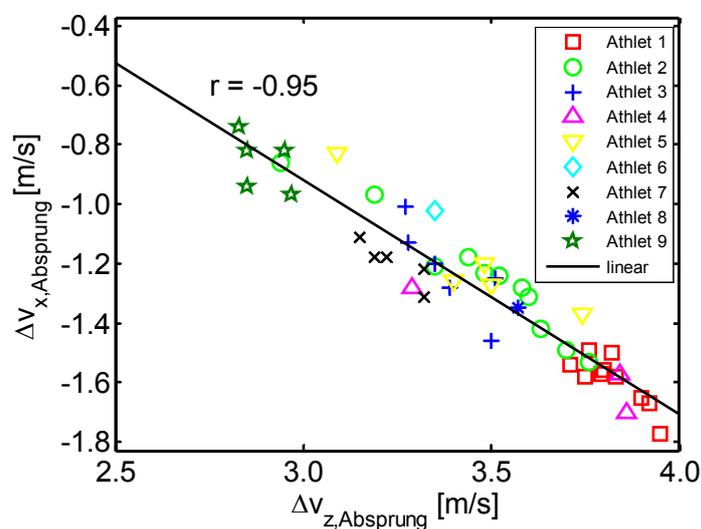


Abb. 4.30: Zusammenhang der horizontalen Geschwindigkeitsverluste $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ und der vertikalen Geschwindigkeitsgewinne $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ für die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf.

Bodenreaktionskräfte bei unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten

Der Vergleich der Bodenreaktionskräfte für die Weitsprünge aus unterschiedlichen Anlaufdistanzen anhand der Mittelwerte der Athleten zeigt, dass für den vertikalen und für den horizontalen Bremskraftstoß nur geringe Unterschiede messbar sind. Differenzen liegen bei den ersten vertikalen Kraftmaxima und den horizontalen Kraftminima vor. Dies zeigt sich entsprechend im vertikalen und im horizontalen Bremskraftstoß $-S_z$ und $-S_x$. Auch für den vertikalen Beschleunigungskraftstoß $+S_z$ zeigt sich bei einigen Athleten ein Unterschied. Der horizontale Beschleunigungskraftstoß fällt jedoch bei allen Sprüngen etwa gleich groß aus.

Tab. 4.19 sind die Mittelwerte und die minimalen und maximalen Werte der Kraftstöße für jeden Athleten bezüglich beider Anlaufdistanzen zu entnehmen.

Tab. 4.19: Mittelwerte der vertikalen $-S_z$, $+S_z$ und horizontalen $-S_x$, $+S_x$ Brems- und Beschleunigungskraftstöße der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA jedes Athleten.

Athlet	WkA				mA			
	$-S_z$ [Ns]	$+S_z$ [Ns]	$-S_x$ [Ns]	$+S_x$ [Ns]	$-S_z$ [Ns]	$+S_z$ [Ns]	$-S_x$ [Ns]	$+S_x$ [Ns]
1	53.0 ±5.3 min: 46.2 max: 59.2	210.7 ±12.8 min: 197.7 max: 236.1	-121.7 ±9.0 min: -107.4 max: -132.1	8.8 ±1.4 min: 6.5 max: 11.1	59.3 ±9.2 min: 47.5 max: 71.9	216.7 ±9.3 min: 204.5 max: 234.8	-122.5 ±5.0 min: -116.4 max: -133.7	7.7 ±0.9 min: 6.5 max: 8.9
2	39.6 ±6.5 min: 26.3 max: 47.2	194.2 ±12.0 min: 175.2 max: 213.7	-95.7 ±9.0 min: -77.5 max: -106.8	8.9 ±1.7 min: 6.7 max: 11.0	32.6 ±5.7 min: 21.6 max: 41.8	203.3 ±17.3 min: 175.2 max: 223.3	-93.7 ±13.2 min: -86.7 max: -113.9	8.9 ±1.5 min: 6.0 max: 10.8
3	59.5 ±0.0 min: 59.5 max: 59.5	253.4 ±17.8 min: 240.8 max: 266.0	-134.4 ±7.2 min: -129.3 max: -139.5	12.6 ±3.3 min: 10.2 max: 14.9	54.8 ±10.2 min: 43.7 max: 71.4	255.5 ±19.7 min: 222.3 max: 271.5	-123.7 ±14.3 min: -100.8 max: -142.3	11.6 ±1.4 min: 10.0 max: 13.9
4	45.3 ±0.0 min: 45.3 max: 45.3	227.8 ±4.1 min: 225.0 max: 230.7	-114.5 ±7.0 min: -109.6 max: -119.5	8.2 ±1.2 min: 7.2 max: 9.1	61.5 ±17.6 min: 42.8 max: 77.8	241.4 ±13.0 min: 228.2 max: 254.2	-133.4 ±17.6 min: -113.7 max: -147.4	8.0 ±1.3 min: 6.6 max: 9.1
5	50.1 ±8.0 min: 38.1 max: 59.5	216.8 ±12.5 min: 198.3 max: 230.8	-114.3 ±11.2 min: -101.1 max: -129.3	9.6 ±2.1 min: 7.2 max: 12.8	48.4 ±10.3 min: 37.3 max: 61.8	225.4 ±12.7 min: 207.8 max: 238.2	-104.4 ±14.6 min: -80.1 max: -119.5	10.0 ±2.9 min: 6.4 max: 14.3
6	52.0 ±2.2 min: 50.5 max: 53.6	227.1 ±17.0 min: 215.0 max: 239.1	-117.6 ±19.2 min: -104.0 max: -131.2	9.3 ±0.0 min: 9.3 max: 9.3	48.8 –	210.5 –	-90.6 –	11.6 –
7	34.5 –	211.6 –	-101.7 –	10.7 –	28.6 ±2.8 min: 24.6 max: 31.9	231.8 ±6.2 min: 223.5 max: 240.0	-107.0 ±6.2 min: -102.3 max: -117.2	10.8 ±0.8 min: 9.8 max: 11.5
8	–	–	–	–	50.7	227.8	-113.9	8.6
9	–	–	–	–	37.8 ±6.4 min: 30.6 max: 46.1	165.5 ±5.0 min: 158.7 max: 172.1	-74.6 ±4.3 min: -68.7 max: -87.7	14.4 ±1.9 min: 12.0 max: 16.3
M	48.5 ±8.5	212.5 ±18.8	-113.5 ±14.7	9.2 ±1.9	44.5 ±15.8	212.7 ±41.5	-104.8 ±25.1	9.7 ±2.9

Typische Beispiel für diese Differenzen veranschaulicht Abb. 4.31. Hier sind für die Kraft-Zeit-Verläufe von vier Weitsprüngen aus dem Wettkampfanlauf und für den mittleren Anlauf von vier Athleten exemplarisch übereinander gelegt.

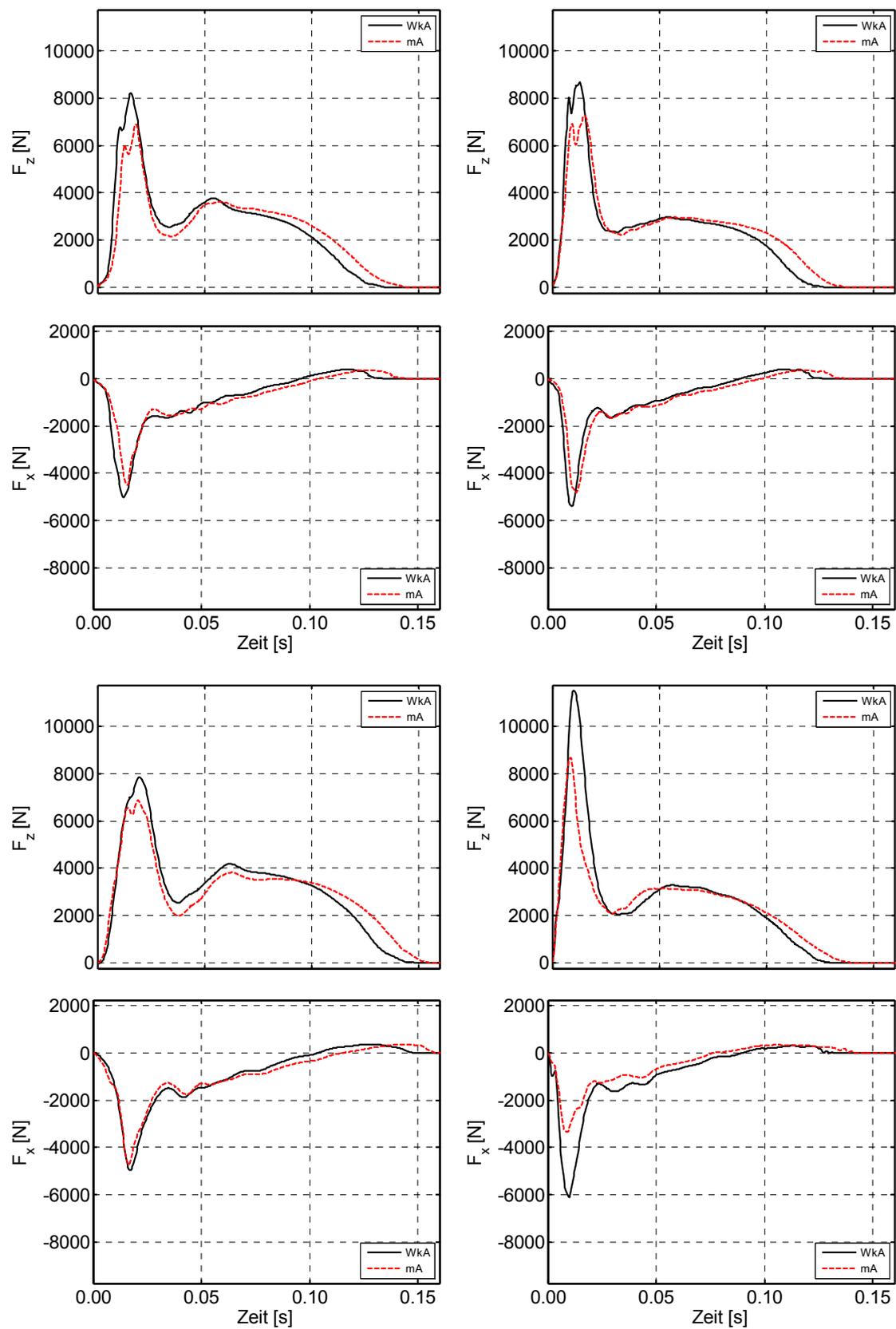


Abb. 4.31: Typische Bodenreaktionskräfte von vier Athleten (oben rechte: Athlet 1, links: Athlet 2, unten rechts: Athlet 3, rechts: Athlet 5) aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Abflugwinkel bei unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten

Für die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf betragen die Mittelwerte der Abflugwinkel $\alpha_{Abflug} = 21.3^\circ \pm 2.3^\circ$. Der Mittelwert der Stichprobe ist verglichen mit dem aus dem Wettkampfanlauf ($\alpha_{Abflug} = 20.2^\circ$) um 1.1° größer. Die errechneten Abflugwinkel der Sprünge aus dem mittleren Anlauf streuen vergleichsweise über einen größeren Bereich.

Die Streubreite beträgt 5.3° beim Wettkampfanlauf und 9.3° beim mittleren Anlauf. Dies ist allerdings darauf zurückzuführen, dass ein Weitspringer (Athlet 9) sehr wenig in vertikale Richtung umlenkt und somit kaum vertikale Abfluggeschwindigkeit erzeugt. Zudem bringt er keine Sprünge aus dem Wettkampfanlauf in die Datenstichprobe mit ein, was beim Vergleich der Streuung berücksichtigt werden muss. Entscheidend ist aber, dass die individuelle Streuung für die Sprünge aus dem mittleren Anlauf geringer ist. Dies zeigen die Standardabweichungen der individuellen Abflugwinkel.

Abb. 4.32. veranschaulicht die Abflugwinkel in Abhängigkeit zur horizontalen Anfangsgeschwindigkeit bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf (im Vergleich zu Abb. 4.13).

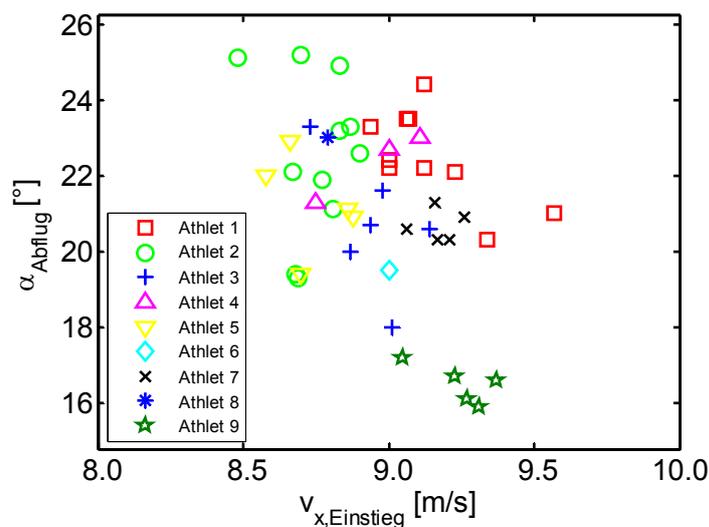


Abb. 4.32: Abhängigkeit der Abflugwinkel α_{Abflug} von der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,Einstieg}$ der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf.

Absprungsquotient bei unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten

Bei Weitsprüngen aus dem mittleren Anlauf werden Quotienten von 1.6 bis 3.1 erreicht. Wenn der Quotient als Qualitätskriterium des Umlenkverhaltens interpretiert wird, so sind – gemessen an den Werten des Quotienten – bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf

herangezogen werden kann und ob für die erhobenen Leistungsparameter Rückschlüsse auf die Ausbildung der Technik und damit auf die Ausführung der Wettkampfsprünge zulassen. Um Kenntnisse darüber zu erlangen, werden die Mittelwerte einiger kinematischer und dynamischer Parameter der Sprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf für fünf Weitspringer in Säulendiagrammen dargestellt. Zusätzlich sind die Fehlerbalken der Standardabweichungen eingezeichnet.

Hinsichtlich der Sprungweite W wurden bei Weitsprüngen aus dem Wettkampfanlauf ($M_{\text{WkA}}: W = 7.02\text{m}$) im Mittel 0.19m größere Sprungweiten erreicht als bei denen aus dem mittleren ($M_{\text{mA}}: W = 6.83\text{m}$). Etwas größer fallen die Unterschiede mit 0.30m bei der theoretischen Sprungweite W_{theor} aus ($M_{\text{WkA}}: W_{\text{theor}} = 7.33\text{m} \pm 0.26\text{m}$, $M_{\text{mA}}: W_{\text{theor}} = 7.05\text{m} \pm 0.19\text{m}$). Die Unterschiede sind für beide Parameter signifikant (siehe Tab. 4.20).

Da sich die Sprungweiten maßgeblich aus den horizontalen Anlaufgeschwindigkeiten ergeben, lassen sich auch für die Geschwindigkeiten auf Höhe der zweiten Lichtschranke v_{LS2} , für die horizontale Anfangsgeschwindigkeit $v_{x,\text{Einstieg}}$ und für die Gesamtanfangsgeschwindigkeit $v_{\text{ges},\text{Einstieg}}$ signifikante Unterschiede nachweisen. Die Differenzen der horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten für beide Anlaufängen sind in Abb. 4.34 (oben links) aufgezeigt.

Die vertikale Anfangsgeschwindigkeit ist unabhängig von der Anlaufgeschwindigkeit und zeigt auch keine Unterschiede zwischen den beiden Anlaufdistanzen. In Abb. 4.34 (oben rechts) ist erkennbar, dass die vertikale Geschwindigkeitskomponente einiger Weitspringer beim mittleren Anlauf kleiner ausfällt, bei zwei Athleten jedoch größer ist.

Die Abfluggeschwindigkeiten sind geprägt von den horizontalen Geschwindigkeitskomponenten und weisen somit für die horizontalen Abfluggeschwindigkeiten $v_{x,\text{Abflug}}$ (mit einem Unterschied von 0.47m/s) einen signifikanten Unterschied auf ($M_{\text{WkA}}: v_{x,\text{Abflug}} = 8.03\text{m/s} \pm 0.24\text{m/s}$, $M_{\text{mA}}: v_{x,\text{Abflug}} = 7.56\text{m/s} \pm 0.21\text{m/s}$). Auch die Gesamt-abfluggeschwindigkeiten aus dem Wettkampfanlauf sind zwar im Mittel nur 0.41m/s größer, unterscheiden sich aber dennoch signifikant ($M_{\text{WkA}}: v_{\text{ges},\text{Abflug}} = 8.52\text{m/s} \pm 0.21\text{m/s}$, $M_{\text{mA}}: v_{\text{ges},\text{Abflug}} = 8.11\text{m/s} \pm 0.16\text{m/s}$).

Die vertikalen Abfluggeschwindigkeiten sind im Mittel nahezu gleich. Für drei Athleten (1, 4 und 5) zeigt sich die Tendenz, dass die vertikale Abfluggeschwindigkeit der Sprünge aus dem mittleren Anlauf etwas größer ausfällt (siehe Abb. 4.34 unten rechts).

Der Abflugwinkel spiegelt das Verhältnis der horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeiten wider. Während sich der Geschwindigkeitsgewinn in vertikaler

Richtung bei beiden Anlaufdistanzen statistisch nicht unterscheidet, fällt die horizontale Abfluggeschwindigkeit bei Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf so viel höher aus, dass sich der Unterschied im Abflugwinkel schlussendlich als signifikant erweist.

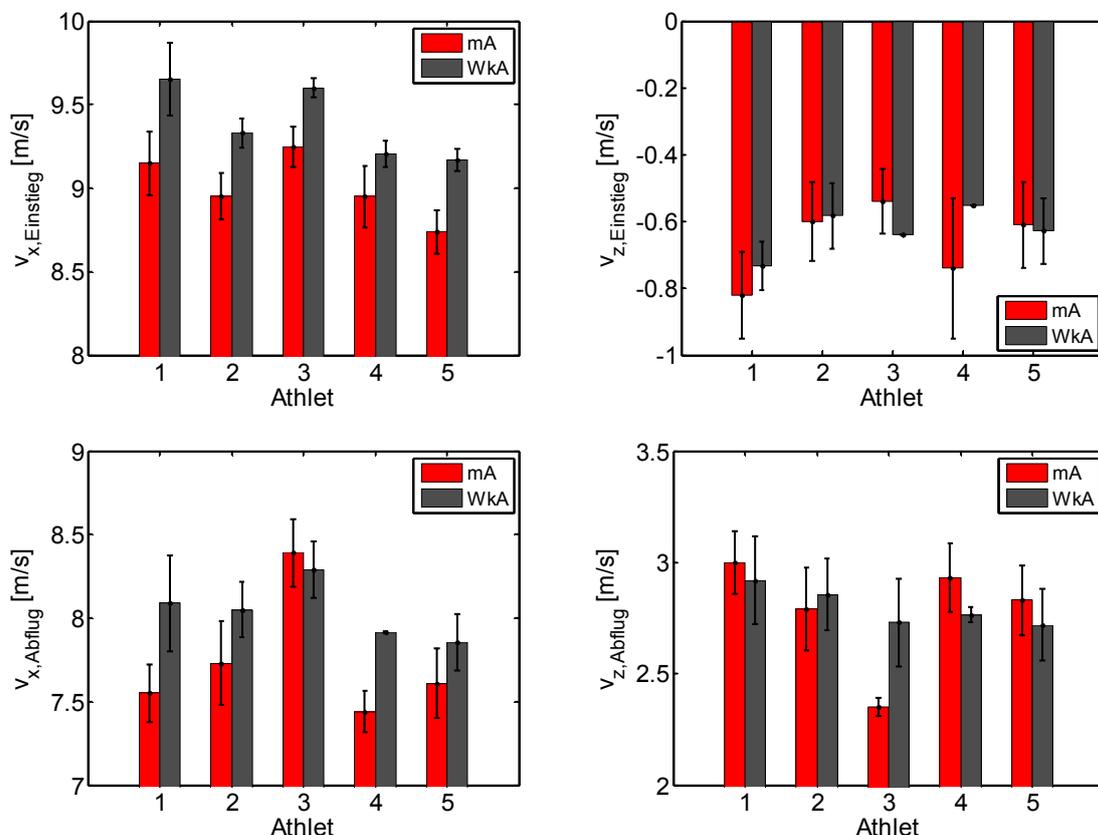


Abb. 4.34: Horizontale $v_{x,Einstieg}$ und vertikale $v_{z,Einstieg}$ Anfangsgeschwindigkeiten (oben) sowie horizontale $v_{x,Abflug}$ und vertikale $v_{z,Abflug}$ Abfluggeschwindigkeiten (unten) der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Dass das Beschleunigen in vertikaler Abflugrichtung aus beiden Anlaufdistanzen gleich gut gelingen kann, zeigt sich an den geringen Mittelwertunterschieden der vertikalen Abfluggeschwindigkeit ($M_{WkA}: v_{z,Abflug} = 2.84\text{m/s} \pm 0.18\text{m/s}$, $M_{mA}: v_{z,Abflug} = 2.93\text{m/s} \pm 0.20\text{m/s}$) und der vertikalen Geschwindigkeitsänderung ($M_{WkA}: \Delta v_{z,Absprung} = 3.49\text{m/s} \pm 0.21\text{m/s}$, $M_{mA}: \Delta v_{z,Absprung} = 3.57\text{m/s} \pm 0.25\text{m/s}$). Gleichzeitig wird an den individuellen Ausprägungen und Standardabweichungen der Athleten deutlich, wie instabil der Parameter ist (siehe Abb. 4.35 rechts). Die Mittelwertunterschiede der horizontalen Geschwindigkeitsreduktionen zeigen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ($M_{WkA}: \Delta v_{x,Bremsen} = -1.52\text{m/s} \pm 0.18\text{m/s}$, $M_{mA}: \Delta v_{x,Bremsen} = -1.48\text{m/s} \pm 0.22\text{m/s}$, $M_{WkA}: \Delta v_{x,Absprung} = -1.40\text{m/s} \pm 0.19\text{m/s}$, $M_{mA}: v_{x,Absprung} = -1.36\text{m/s} \pm 0.23\text{m/s}$). Auch hier sind große interindividuelle Streuungen messbar (siehe Abb. 4.35

links). Im Hinblick auf den horizontalen Beschleunigungsanteil erreichen die Athleten beim mittleren Anlauf im Mittel nahezu identische Geschwindigkeitsgewinne.

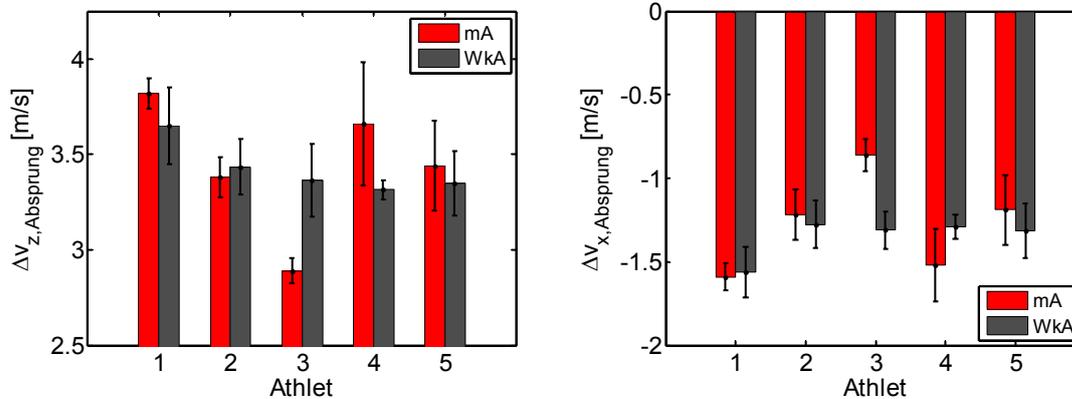


Abb. 4.35: Vertikale $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ und horizontale $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ Geschwindigkeitsänderung der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Die Anfangsposition beim Fußaufsatz bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf unterscheidet sich bezüglich des Stemmwinkels ($M_{\text{WkA}}: \alpha_{\text{Stemmen}} = 27.4^\circ \pm 2.8^\circ$, $M_{\text{mA}}: \alpha_{\text{Stemmen}} = 26.6^\circ \pm 2.8^\circ$) und des Kniewinkels beim Fußaufsatz ($M_{\text{WkA}}: \alpha_{\text{Knie, Aufsatz}} = 164.9^\circ \pm 3.0^\circ$, $M_{\text{mA}}: \alpha_{\text{Knie, Aufsatz}} = 163.9^\circ \pm 3.1^\circ$) nur gering und somit nicht signifikant. Bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf werden etwas größere Stemmwinkel beobachtet. Es wird also mehr gestemmt.

Ein Springer (Athlet 4) stemmt beim mittleren Anlauf im Mittel mehr als beim Wettkampfanlauf, was unüblich ist. Die Variabilität der Stemmwinkel ist insgesamt aber so groß, dass sich in Einzelfällen sogar – wie am Beispiel von Athlet 4 – eine Ausprägung gegen den Trend ergeben kann. Für die Kniewinkel beim Auftreffen liegen noch größere Streuungen vor. Die intraindividuellen Differenzen der Sprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf sind dabei deutlich größer. Beide Winkel sind in Abb. 4.36 dargestellt.

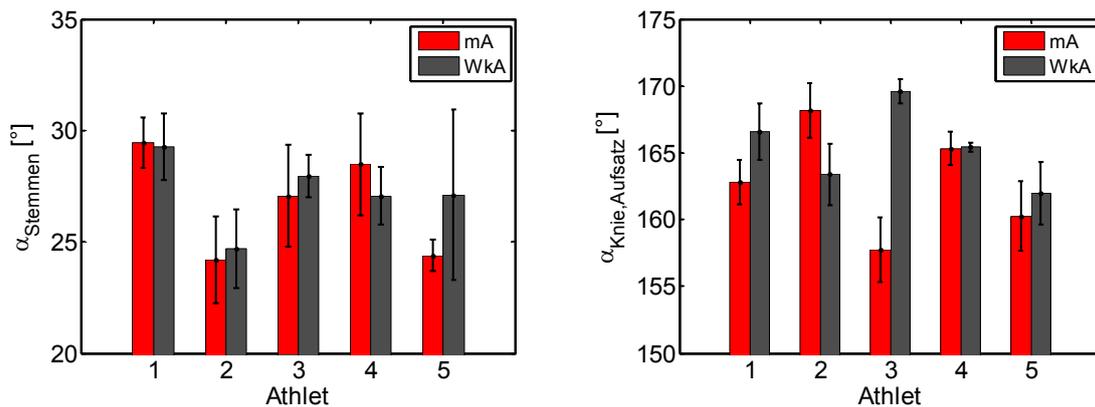


Abb. 4.36: Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$ und Kniewinkel beim Fußaufsatz $\alpha_{Knie,Aufsatz}$ der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Bei der Sprungbeinbewegung sind zwar kleine Mittelwertdifferenzen für den kleinsten Kniewinkel in der Beugephase ($M_{WkA}: \alpha_{Knie,min} = 132.5^\circ \pm 5.6^\circ$, $M_{mA}: \alpha_{Knie,min} = 131.1^\circ \pm 4.9^\circ$), den Kniewinkel beim Lösen ($M_{WkA}: \alpha_{Knie,Abflug} = 170.6^\circ \pm 3.5^\circ$, $M_{mA}: \alpha_{Knie,Abflug} = 171.2^\circ \pm 3.8^\circ$) sowie für die Kniewinkeländerung beim Beugen ($M_{WkA}: \Delta\alpha_{Knie,Beugen} = 32.5^\circ \pm 6.0^\circ$, $M_{mA}: \Delta\alpha_{Knie,Beugen} = 32.8^\circ \pm 4.0^\circ$) festzustellen. Diese Unterschiede lassen sich jedoch nicht als signifikant nachweisen. Ein Grund dafür ist sicherlich die größere Streuung der Parameter, die an den Standardabweichungen in Abb. 4.37 zu sehen ist. Bei der Streckbewegung, also der Kniewinkeländerung beim Abdruck lassen sich hingegen signifikante Differenzen nachweisen ($M_{WkA}: \Delta\alpha_{Knie,Abdruck} = 38.1^\circ \pm 3.6^\circ$, $M_{mA}: \Delta\alpha_{Knie,Abdruck} = 40.1^\circ \pm 3.1^\circ$).

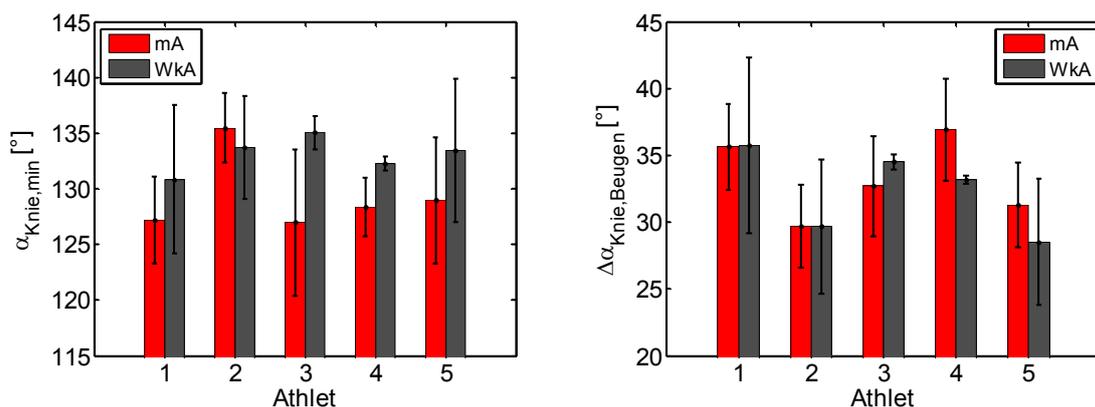


Abb. 4.37: Kleinster Kniewinkel $\alpha_{Knie,min}$ und Kniewinkeländerung $\Delta\alpha_{Knie}$ während der Stützzeit der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Betrachtet man die Kniewinkeländerung im Zusammenhang mit unterschiedlichen horizontalen Anfangsgeschwindigkeiten $v_{x,Einstieg}$ ist festzustellen, dass trotz der größeren horizontalen Anfangsgeschwindigkeit beim Wettkampfanlauf die Kniewinkeländerungen bei beiden Anlaufdistanzen etwa gleich ausgeprägt sind.

Die Unterschiede in der Stützzeit ($M_{WkA}: t_{Stütz} = 0.135s \pm 0.009s$, $M_{mA}: t_{Stütz} = 0.140s \pm 0.010s$) sind signifikant. Dadurch steht für den mittleren Anlauf mehr Zeit für eine vertikale Geschwindigkeitsänderung zur Verfügung.

An der Gegenüberstellung des Quotienten $Q_{Absprung}$ der Sprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf wird deutlich, dass die Qualität des Umlenkverhaltens bei niedrigen Geschwindigkeiten prinzipiell besser ist. Für den Absprungquotienten ($M_{WkA}: Q_{Absprung} = 2.05 \pm 0.21$, $M_{mA}: Q_{Absprung} = 2.22 \pm 0.33$) lassen sich signifikante Unterschiede errechnen. Diese sind auf die etwas größeren vertikalen Geschwindigkeitsgewinne bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf zurückzuführen. Wie gut es den einzelnen Athleten gelingt, die horizontalen Einstiegsgeschwindigkeiten mit größeren Anlaufgeschwindigkeiten in eine optimale vertikale Abflugrichtung umzulenken, zeigen die interindividuellen Differenzen in Abb. 4.38.

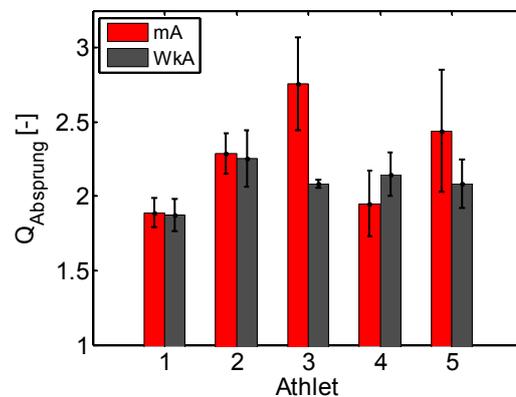


Abb. 4.38: Absprungquotient $Q_{Absprung}$ der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die geringere Anlaufgeschwindigkeiten der Sprünge aus dem mittleren Anlauf und der etwas längeren Stützzeiten sich in vertikaler Richtung mehr Geschwindigkeitsgewinn erzeugen lässt. Dies zeigt sich dann wieder in größeren Abflugwinkeln. Sowohl das Stemmverhalten als auch die folgende Umlenkbewegung (die Kniewinkel beim Auftreffen und beim Abflug sowie die Kniewinkeländerung) sind jedoch den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf relativ ähnlich.

Allgemein kann festgehalten werden, dass aufgrund der variierenden kinematischen Parameter, die berechneten Ergebnisse der Mittelwertvergleiche nur als Trend zu interpretieren sind. Weil außerdem die Anzahl der ausgewerteten Sprünge sehr gering ist, wirken sich einzelne Absprungparameter bei den individuellen Parameterdarstellungen stark aus. Außerdem ist die Anzahl der eingebrachten Sprünge von einzelnen Springern unterschiedlich groß, was die Darstellung der interindividuellen Mittelwertvergleiche beeinträchtigt.

Tab. 4.20 gibt eine Übersicht über die statistischen Unterschiede der Weitsprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf.

Tab. 4.20: Übersicht der Mittelwertunterschiede der Weitsprünge aus dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA.

¹ Varianzen sind nicht gleich, * signifikanter Unterschied.

Parameter	WkA mA	Signifikanz $2p < 0.05$
W [m]	7.03 6.84	0.000*¹
W _{theor} [m]	7.32 7.02	0.000*
v _{LS2} [m/s]	9.49 8.86	0.000*
F _{z,Max1} [N]	8517 7647	0.005*
F _{x,Min} [N]	-4897 -4382	0.003*
α_{Stemmen} [°]	27.4 26.6	0.255
$\alpha_{\text{Knie,Aufsatz}}$ [°]	164.9 163.9	0.171
$\alpha_{\text{Knie,min}}$ [°]	132.5 131.1	0.283
$\alpha_{\text{Knie,Abflug}}$ [°]	170.6 171.2	0.535
$\Delta\alpha_{\text{Knie,Beugen}}$ [°]	32.5 32.8	0.779 ¹
$\Delta\alpha_{\text{Knie,Abdruck}}$ [°]	38.1 40.1	0.019*
α_{Abflug} [°]	20.3 22.0	0.000*

Parameter	WkA mA	Signifikanz $2p < 0.05$
v _{x,Einstieg} [m/s]	9.44 8.91	0.000*
v _{x,Abflug} [m/s]	8.03 7.56	0.000*
$\Delta v_{x,\text{Absprung}}$ [m/s]	-1.40 -1.36	0.393
$\Delta v_{x,\text{Bremsen}}$ [m/s]	-1.52 -1.48	0.329
$\Delta v_{x,\text{Beschl}}$ [m/s]	0.12 0.12	0.603
v _{z,Einstieg} [m/s]	-0.65 -0.64	0.693 ¹
v _{z,Abflug} [m/s]	2.84 2.93	0.056
$\Delta v_{z,\text{Absprung}}$ [m/s]	3.49 3.57	0.188
+S _z [Ns]	211.5 222.5	0.045*
Q _{Absprung} [-]	2.05 2.22	0.021*
F _{z,Max2} zu F _{z,Min} [-]	1.46 1.47	0.830
t _{Stütz} [s]	0.135 0.140	0.036*

Auf der Basis der beiden Vergleichsansätze kann zusammengefasst werden, dass sich zwischen den Weitsprüngen aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf Unterschiede hinsichtlich der ersten Kraftmaxima $F_{z,Max1}$, der vertikalen Kraftstöße $+S_z$, der

horizontalen Kraftminima $F_{x,Min}$, dem Zeitpunkt des Erreichens der Beschleunigungsumkehr t_{Fx0} und der Abflugwinkel α_{Abflug} nachweisen lassen.

Aus dem interindividuellen Vergleich der relevanten Parameter geht andererseits hervor, dass sich die bereits in Kapitel 4.3 beschriebenen individuellen Muster der Athleten der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf auf die aus dem mittleren Anlauf übertragen lassen. Dies lässt sich an den Stemmpositionen sowie den Parametern der Umlenkbewegung (Kniewinkel beim Aufsatz und beim Abflug und Kniewinkeländerung) verdeutlichen.

Die Vergleiche der Bodenreaktionskräfte (Abb. 4.22 und Abb. 4.23) lassen erkennen, dass auch die individuellen dynamischen Absprungmuster aus den beiden Anlaufdistanzen sehr ähnlich sind. Am horizontalen und vertikalen Kurvenverlauf sowie an den Anteilen der Kraftstöße $-S_z$, $+S_z$, $-S_x$ und $+S_x$ können typbedingte Eigenheiten und letztlich allgemeingültige Stärken und Schwächen identifiziert werden. Dies gilt gleichermaßen für Sprünge aus dem Wettkampf- wie für die aus dem mittleren Anlauf.

Der Grad des Nachgebens im Sprungbein ist hauptsächlich von den Muskeleigenschaften und der Muskelaktivierung abhängig und darüber hinaus bedingt durch die seriell geschalteten Sehnen und Aponeurosen. Diese Eigenschaften sind größtenteils die Folge des mehrjährigen Trainings, aber auch zu großen Teilen als Dispositionen der einzelnen Weitspringer zu sehen. Die technische Ausführung in der Umlenkbewegung scheint daher zum einen biologische Ursachen zu haben und zum anderen durch eine individuell programmierte Lösungsstrategie zu entstehen.

Für die trainingspraktischen Leistungsdiagnosen bedeutet das, dass die Sprünge aus dem mittleren Anlauf generell sowohl für die Technikanalysen als auch für Prognosen der Sprungleistungen eingesetzt werden können. Die Leistungsabschätzung muss vor allem unter Berücksichtigung der Differenzen bei den horizontalen und vertikalen Kraftstößen und den Abflugwinkeln bewertet werden.

Aus den grafischen Darstellungen (Säulendiagramme) der Athleten geht hervor, dass die Parameterausprägungen bei kleiner Anzahl von einzelnen Versuchen, und somit gerade von den weniger gelungenen Sprüngen, beeinflusst werden. In Einzelfällen weichen beim Vergleich der Sprünge aus dem mittleren und Wettkampfanlauf die Mittelwerte bestimmter Absprungparameter dann untypisch zueinander ab.

Die Streuungen, die bei derartigen Analysen immer zu erwarten sind, die auch in der Arbeit an einigen Punkten beschrieben wurden, können dann besser interpretiert und erklärt werden, wenn für einen Athleten mehrere Messergebnisse vorliegen. Anhand der

individuellen Varianz und damit seinem funktionellen Lösungsweg, können dann mit theoretischen Überlegungen die Ausprägung einzelner Parameter optimiert werden.

Für die Leistungsdiagnostiken lässt sich damit ableiten, dass eine fundierte Leistungsbewertung auf jeden Fall mehrere Technikanalysen zu verschiedenen Zeitpunkten über die Saison hinweg erfordert. Finden Leistungsdiagnosen nur zweimal im Jahr und anhand von zu wenigen Sprüngen statt, so können nur schwer Istzustände erfasst oder Prognosen erstellt werden. Für eine präzise Analyse sollten also einerseits mehrere Sprünge analysiert werden und für eine intraindividuelle Vergleichbarkeit die individuellen Bewegungsmuster beschrieben werden. Dann können darüber hinaus auch Norm- und Vergleichswerte, die immer relativ sind, zum interindividuellen Vergleich herangezogen werden.

Letztlich finden die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf unter zwei weiteren Aspekten in der Leistungsdiagnostik ihre Rechtfertigung. Die Gründe, die für die Diagnose der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf sprechen, sind vorrangig untersuchungspraktischer Art. Die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf können ganzjährig auf hohem Niveau gesprungen werden, was ein Vergleich über die Saison überhaupt erst möglich macht. Dazu kommt der Tatsache, dass Sprünge aus geringeren Geschwindigkeiten öfters hintereinander auf hohem Niveau durchgeführt werden können. Dies ist dann von Bedeutung, wenn ein Sprung nicht gelingt oder die Athleten beispielsweise beim Absprung die Kraftmessplatte nicht treffen. In diesen Fällen, ist es eher möglich, einige weitere Sprünge aus dem verkürzten Anlauf zu wiederholen, so dass für die Analyse mehrere Versuche zur Verfügung stehen. Liegen für die Technikanalysen mehrere Sprungversuche zu mehreren Zeitpunkten in der Saison vor, können die Ergebnisse auch effektiv als Grundlage zur Trainingssteuerung eingesetzt werden.

4.7 Klassifikation der Sprungtypen

4.7.1 Strategien in der Umlenkbewegung - Kinematik

In Bezug auf die oben beschriebene Überlagerung der Hebelbewegung und der vertikalen Beuge-Streckbewegung des Sprungbeins im Absprung, der Stemmposition sowie der Abflugparameter konnten für die jeweiligen Weitspringer jeweils typische Bewegungsabläufe festgestellt werden. Die individuellen Ausprägungen der

beschriebenen Weitsprungparameter lassen ein Muster im individuellen Umlenkverhalten erkennen. Der Vergleich dieser Muster untereinander zeigt, dass etwa gleiche Sprungweiten – bei annähernd gleicher Anlaufgeschwindigkeit – mit unterschiedlichen Strategien in der Umlenkbewegung erreicht werden können. Das heißt, dass für das Umlenken der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit in bestimmte Abflugparameter unterschiedliche Parameterkombinationen feststellbar sind. Den unterschiedlichen Umlenkbewegungen geht dabei außerdem eine bestimmte Stemmposition voraus.

Dazu kommt, dass auch für die Abflugbedingungen, also für die Anteile der horizontalen und vertikalen Abfluggeschwindigkeit, verschiedene Strategien möglich sind. Wie in Kapitel 4.4 gezeigt wurde, können gleiche Weiten mit unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten erzielt werden.

Auf der Grundlage theoretischer Berechnungen und anhand der Ergebnisse der analysierten Leistungsklasse von männlichen Kaderathleten wurden mögliche Lösungsstrategien als drei Varianten (Typ A, B und C) definiert und somit die Technik des Absprungs klassifiziert.

Bei Typ A erfolgt das Einstemmen mit größerem Stemmwinkel und mit mittlerer bis großer Sprungbeinstreckung beim Auftreffen. Aus dieser Anfangsposition wird in der ersten Phase des Absprungs das Sprungbein über mehr Kniewinkeländerung gebeugt. Danach findet eine ausgeprägte, vertikale Streckbewegung statt. Da der Absprung über mehr Beuge-Streckbewegung erfolgt, zeigen sich auch im Abflug tendentiell kleinere Stützwinkel.

Typ B setzt das Sprungbein mit weniger großem Stemmwinkel und mittlerer bis großer Sprungbeinstreckung und somit aus einer eher höheren Position auf. Über weniger Kniewinkeländerung wird aufgrund des geringeren Stemmwinkels der mittlere Stützpunkt schneller erreicht. Die Streckbewegung ist etwas geringer ausgeprägt, womit sich die Absprungbewegung durch mehr Hebelwirkung auszeichnet.

Abb. 4.39 veranschaulicht diese beiden am häufigsten vorkommenden Umlenkbewegung anhand von zwei typischen Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf für gleiche Sprungweiten. Die übereinander dargestellten Sprünge wurden auch in Abb. 4.5 in den Piktogrammen dargestellt.

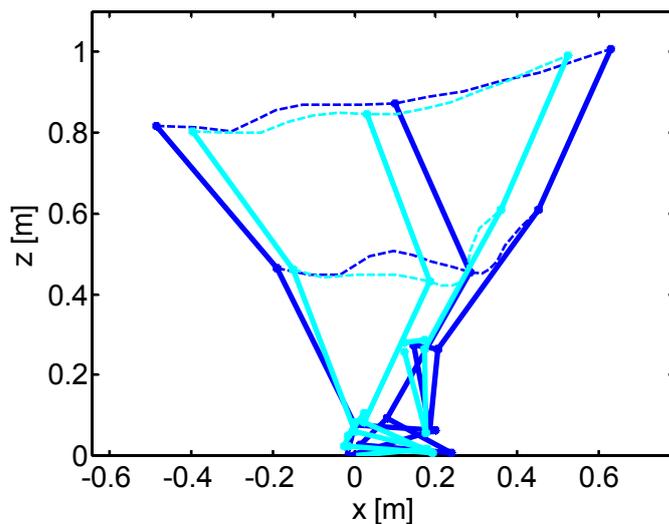


Abb. 4.39: Exemplarische Darstellung der Knie- und Hüfttrajektorien zweier Weitspringer (Typ A: blau (Athlet 1) und Typ B: hellblau (Athlet 2)) bei Weitsprüngen aus dem Wettkampfanlauf mit Sprungweiten von $W = 7.25\text{m}$. Eingezeichnet sind die Stemmposition, die kleinste Kniewinkelposition und die Abflugposition mit den Knie- und Hüftpositionsverläufen.

Bei Typ C dominiert im Unterschied zu den beiden anderen Typen die horizontale Geschwindigkeitskomponente. Der Einstieg des Sprungbeins wird mit kleinem Kniewinkel begonnen. Mit wenig Kniewinkeländerung im Sprungbein erfolgt das Umlenken der Anlaufgeschwindigkeit wie ein „Durchschieben“. Die Streckbewegung in vertikaler Richtung ist wenig ausgeprägt, der Abflug erfolgt mit stärker gebeugtem Kniegelenk. Der Absprung ist aufgrund der fehlenden Hebelwirkung und somit sehr geringer Bremswirkung sehr schnell. Abb. 4.40 stellt die Piktogramme des Sprungbeins aller drei Typen gegenüber.

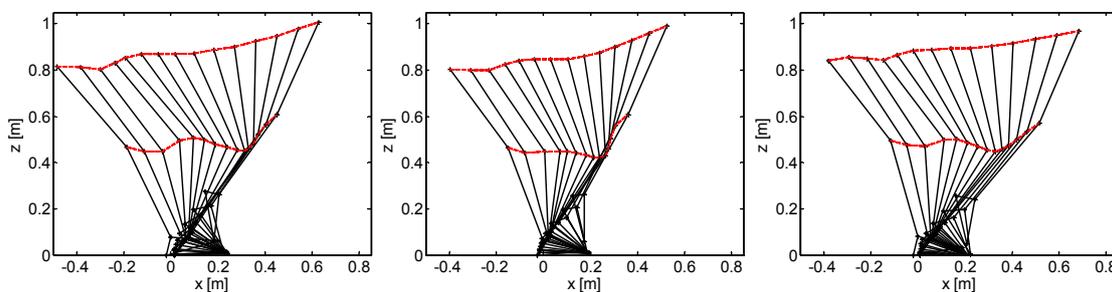


Abb. 4.40: Darstellung der drei Muster der Sprungbeinbewegung während des Absprungs. Links: exemplarisch für Typ A, Mitte: Typ B, rechts: Typ C.

Für das Muster von Typ C liegen zwar bei der Stichprobe der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf keine Beispiele vor. Jedoch weist ein Weitspringer (Athlet 9, siehe Abb. 4.40) dieses Absprungsverhalten sehr konstant auf. Er konnte für die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf keine Versuche einbringen, bei denen die Kraftmessplatte mit dem ganzen Fuß getroffen wurde, so dass hier nur seine kinematischen Daten der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf (ohne die Bodenreaktionkräfte) verglichen werden können.

Ein direkter Vergleich seines Absprungmusters kann nur anhand der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf erfolgen, für die sich die Absprungmuster ebenso nachweisen lassen (siehe Kapitel 4.6 und Huber et al., 2010). Demnach können in einem bestimmten Toleranzbereich individuelle und funktionelle Technikvarianten realisiert werden: Die Absprungbewegung, die tendentiell eher durch eine Beuge-Streckbewegung geprägt ist (dominiert durch die Kniewinkeländerung) steht die Absprungbewegung mit dominanter Hebelbewegung gegenüber. Das Hebeln ist hier über die „Steifigkeit“ des Sprungbeines definiert. Das Rotieren über die Stützstelle erfolgt somit durch weniger Kniewinkeländerung. Der dritte Typ, der sich ebenfalls als effizient erweist, zeichnet sich weder durch das Hebeln noch durch eine Beuge-Streckbewegung, sondern durch eine Mischform der beiden Strategien aus. Zwar kann das Hebeln über die Stützstelle nicht verhindert werden, jedoch wird das Beugen und insbesondere das Strecken des Sprungbeins kaum forciert. Die Umlenkung der Anlaufgeschwindigkeit erfolgt über ein Durchschieben, das mit kleinem Kniewinkel und wenig Kniewinkeländerung realisiert wird.

Um die kinematische Typisierung auf der Grundlage der Merkmalsausprägung der Absprungbewegung anhand von Begriffen voneinander abzugrenzen, sind in Tab. 4.21 die Definitionen der Typen A, B und C zusammengefasst.

Tab. 4.21: Kinematische Definition der Absprungtypen.

Typen	Sprungbeinbewegung	Kniewinkel in Abhängigkeit von der Anfangsposition
Beugen-Strecken: Typ A	definiert über eine dominante Vertikalbewegung: viel Kniewinkeländerung im Absprung (wenig „steifes“ Sprungbein)	weites Stemmen, großer Kniewinkel beim Einstieg und beim Lösen, steiles Abdrücken
Hebeln: Typ B	definiert über eine dominantere Horizontalbewegung: wenig Kniewinkeländerung („steifes“ Sprungbein)	enges Stemmen, großer Kniewinkel beim Einstieg und beim Lösen, steiles Abdrücken
Durchschieben: Typ C	definiert über eine sehr dominante Horizontalbewegung: wenig Kniewinkeländerung („steifes“ Sprungbein)	enges Stemmen, kleiner Kniewinkel beim Einstieg und beim Lösen, flaches Abdrücken

4.7.2 Strategien in der Umlenkbewegung - Dynamik

Für die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderungen lassen sich analog drei Abstufungen einteilen. Um zunächst zu klären, mit welchen horizontalen Brems- und welchen vertikalen Beschleunigungsanteilen gute Sprünge erreicht werden, wurden die analysierten Sprünge bezüglich der Verhältnisse dieser Parameter untersucht. Dabei wurde ersichtlich, dass die größten Sprungweiten sowohl mit größten horizontalen Bremsen als auch mit durchschnittlichen vertikalen Beschleunigungen erreicht werden. Exemplarisch wurden die Sprünge ab einer Weite von $W = 7.20\text{m}$ in Tab. 4.22 aufgelistet. Die Sprünge werden von drei Athleten erreicht und zeichnen sich durch drei unterschiedliche, typbedingte Ausprägungen aus.

Das Umlenkverhalten erfolgt mal durch großen horizontalen Geschwindigkeitsverlust und sehr großen vertikalen Geschwindigkeitsgewinn, mal durch geringeren horizontalen Geschwindigkeitsverlust und relativ wenig vertikalen Zugewinn oder auch durch viel horizontalen Geschwindigkeitsverlust, bei kleinerem Zugewinn in vertikaler Richtung. Dass der dritte Fall bei gleichen Anfangsbedingungen in seiner Effizienz begrenzt ist und so geringere Weiten erzielt werden, zeigt Tab. 4.22. Bei allen Sprüngen über $W = 7.20\text{m}$ waren die Anlaufgeschwindigkeiten größer als 9.5m/s .

Tab. 4.22: Horizontale $\Delta v_{x,\text{Absprung}}$ und vertikale $\Delta v_{z,\text{Absprung}}$ Geschwindigkeitsänderung von drei Athleten gelistet nach der effektiven Sprungweite W bei Weitsprüngen aus dem Wettkampfanlauf.

W [m]	$\Delta v_{x,\text{Absprung}}$ [m/s]	$\Delta v_{z,\text{Absprung}}$ [m/s]	Athlet und Messtermin
7.45	-1.72	3.91	Athlet 1, T13
7.30	-1.39	3.50	Athlet 3, T8
7.25	-1.60	3.85	Athlet 3, T8
7.25	-1.43	3.62	Athlet 2, T11
7.25	-1.23	2.23	Athlet 1, T13
7.20	-1.71	3.81	Athlet 1, T13
7.20	-1.62	3.82	Athlet 1, T5

Kategorisiert man für den Leistungsbereich der männlichen Kaderathleten die dynamischen Absprungparameter nach theoretisch realisierbaren und effizienten Möglichkeiten, so lassen sich hier unter Einbezug bisheriger Ergebnisse drei Absprungtypen (Typ A', B' und C') definieren.

Typ A' zeichnet sich im Umlenkverhalten durch große Geschwindigkeitsverluste aufgrund von starkem horizontalem Bremsen aus. Durch eine ausgeprägte

Absprungstreckung aus tieferer Position erzielt er jedoch einen großen vertikalen Geschwindigkeitsgewinn. Diesem Typ könnte Athlet 1 zugeordnet werden.

Typ B' erzielt zwar in vertikaler Richtung keinen großen Zugewinn an Abfluggeschwindigkeit, verliert aber zugleich durch das horizontale Bremsen nur wenig Horizontalgeschwindigkeit. In dieses Muster fallen Athlet 2 und 3.

Eine weitere theoretisch mögliche Absprungtechnik könnte Typ C' darstellen:

Typ C' investiert kaum in den vertikalen Geschwindigkeitsgewinn und erzielt somit wenig vertikale Abfluggeschwindigkeit. Er gestaltet jedoch seinen Umlenkprozess mit derart wenig Stemmwirkung, dass von der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit sehr wenig abgebremst wird. Ein entsprechendes Absprungmuster ist in den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf von Athlet 9 zu erkennen. Da er keine Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf einbringt, kann hierbei jedoch kein quantitativer Vergleich erfolgen.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass mit unterschiedlichen Kombinationen von $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ und $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ gleiche Weiten erzielt werden können. Allerdings bringen nur günstige Kombinationen von Brems- zu Beschleunigungsanteil große Sprungweiten hervor.

Überträgt man die Berechnung des Absprunquotienten Q_{Absprung} auf die definierten Absprungtypen, so können diese (bei gleicher Differenz zwischen Anfangs- und Abfluggeschwindigkeit) bezogen auf die jeweiligen Absprungstrategien bewertet werden.

Um die verschiedenen Beschleunigungsstrategien anhand der unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderungen voneinander abzugrenzen, sind die definierten dynamischen Typen in Tab. 4.23 übersichtlich zusammengefasst.

Tab. 4.23: Dynamische Definition der Absprungtypen .

Typen	Horizontaler Geschwindigkeitsverlust	Vertikaler Geschwindigkeitsgewinn
Beugen-Strecken: Typ A'	großer horizontaler Geschwindigkeitsverlust	großer vertikaler Geschwindigkeitsgewinn, → kleiner Quotient
Hebeln: Typ B'	mittlerer bis geringer horizontaler Geschwindigkeitsverlust	mittlerer vertikaler Geschwindigkeitsgewinn, → mittlerer Quotient
Durchschieben: Typ C'	geringer horizontaler Geschwindigkeitsverlust	wenig vertikaler Geschwindigkeitsgewinn, → großer Quotient

Mit der Gegenüberstellung der drei zunächst isoliert betrachteten kinematischen und dynamischen Absprungtypen wird erkennbar, dass den kinematischen Absprungvarianten eine bestimmte Absprungdynamik zugrunde liegt. Das heißt, dass in den drei beschriebenen, effizienten kinematischen Absprungtypen eine bestimmte Charakteristik der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsänderung zu erkennen ist. Aber auch umgekehrt werden die drei effektiven dynamischen Absprungstrategien nur mit bestimmten kinematischen Anfangsbedingungen und Absprungbewegungen erreicht.

Für die drei definierten Typen lässt sich festhalten, dass die ausgeprägte Beuge-Streckbewegung von Typ A, die sich über große Kniewinkeländerung kennzeichnet, große horizontale Geschwindigkeitsverluste verursacht, aber in vertikaler Abflugrichtung größte Geschwindigkeitsgewinne mit sich bringt, was sich bei Typ A' wieder findet.

Die Absprungkinematik von Typ B, die über die Hebelbewegung beschrieben ist, bei der das Sprungbein wie ein langer, steifer Hebel agiert, zeigt grundsätzlich geringere horizontale Geschwindigkeitsverluste, aber in vertikaler Richtung auch einen geringeren Geschwindigkeitsgewinn. Hierin lässt sich demnach Typ B' erkennen.

Die Absprungbewegung von Typ C, bei dem das Sprungbein gebeugt aufsetzt, aber steif bleibt, kennzeichnet sich durch die geringe Abdruckstreckung in vertikale Richtung, wodurch der Absprung wie ein „Durchschieben“ der Anfangsposition wirkt. Durch diese Absprungkinematik wird die horizontale Anfangsgeschwindigkeit sehr wenig abgebremst und somit effizient in den Abflug übertragen, in vertikaler Richtung wird jedoch wenig Geschwindigkeit dazu gewonnen. Die entsprechende Geschwindigkeitsänderung äußert sich in Typ C'.

Die Absprungtypen können somit übergreifend – im Sinne von drei voneinander unterschiedlichen Absprungstrategien – zu einer Gesamtklassifikation von drei Sprungtypen A, B und C zusammengefasst werden.

4.7.3 Überblick über die definierten Absprungtypen

Aus den kinematischen und dynamischen Mustern ergaben sich drei Möglichkeiten für ein effektives Gestalten der Absprungbewegung. In den jeweiligen Ergebnisteilen wurde bereits herausgestellt, dass im Hinblick auf die qualitative Bewertung nicht alle dieser drei Typen gleich effizient abspringen. Dennoch können mit allen drei Absprungbewegungen potentiell gleich große Sprungweiten erzielt werden. Letztlich zeigen sich selbst bei

dieser homogenen Stichprobe geringe Unterschiede in der Anlaufgeschwindigkeit, die die Ergebnisse ebenso mit prägen.

Mit der Berechnung der theoretischen Sprungweite wurden die jeweiligen Voraussetzungen für das Erzielen einer bestimmte Sprungweite verdeutlicht. Es wurde hierbei sichtbar, mit welcher Kombination der Absprungparameter ein bestimmter Weitenbereich erreicht werden kann. Mit welcher Absprungstrategie der einzelne Springer diese Weiten erreichen kann, muss letztlich individuell in Bezug auf die Konstitution des Einzelnen analysiert und abgeschätzt werden. Da die definierten Typen von einem effektiven Absprungverhalten und einer optimalen Parameterbeschreibung ausgehen, kann nicht jeder Sprung eindeutig einem der beschriebenen Typen zugeordnet werden.

4.7.4 Diagnostik des Weitsprungabsprungbewegung und Einordnung der Ergebnisse

Um das Optimum für die Umlenkbewegung im Weitsprungabsprung zu bestimmen, müssen die Leistungen der besten oder zumindest erfolgreicher Weitspringer auf real umsetzbare, maximal mögliche Parameterausprägungen untersucht werden. Dann können mit Hilfe der individuellen Abflugpositionen und Abfluggeschwindigkeiten (oder beispielsweise anhand der größten gemessenen Anlaufgeschwindigkeiten und den größten Werten für das vertikale Beschleunigen sowie den kleinsten für das horizontale Bremsen) relativ einfach theoretisch mögliche Sprungweiten abgeschätzt werden.

Dass sich rechnerisch ideale Ausprägungen im Absprung nicht immer umsetzen lassen, zeigt sich beispielsweise bei der Berechnung des Abflugwinkels. Während sich für einen optimalen Absprung (schiefer Wurf mit Anfangshöhe) rein mechanisch ein Absprungwinkel von etwa 42° errechnet, können für Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf höchstens etwa 25° (für optimale Absprungvoraussetzungen) tatsächlich beobachtet und erreicht werden (vgl. Linthorne, 2006). Die vertikale Abfluggeschwindigkeit ist demnach durch die Priorität der horizontalen Abfluggeschwindigkeiten limitiert.

Limitierende Einflussgrößen sind außerdem die Muskelkraft des Sprungbeines sowie die der Sehnen und Bänder, die vor allem beim Auftreffen Kräfte bis zu etwa 12000N abfangen müssen. Der vertikale Bremskraftstoß erstreckt sich über einen Zeitraum von weniger als 0.015s. In der verbleibenden Stützzeit von etwa 0.1s muss die Anfangsgeschwindigkeit in vertikale Richtung umgelenkt werden.

Durch die Steifigkeit des kontrahierten Sprungbeins und die federartige Eigenschaft wird beim Nachgeben oder Stauchen Energie gespeichert. Große Anteile davon werden nach der Bewegungsumkehr wieder in vertikale Richtung abgegeben. Dazu kommt die zusätzlich durch das Sprungbein konzentrisch generierte Kraft, mit der die Abfluggeschwindigkeit in vertikale Richtung vergrößert wird. Diese zeigt sich im zweiten vertikalen Kraftstoß. Was die Muskulatur tatsächlich in der vorgegebenen Zeit und unter den gegebenen Bedingungen an Kräften generieren kann, ist somit ebenfalls limitiert.

Da nicht nur die biologischen und konstitutionellen Voraussetzungen, sondern auch das technische und trainingsbedingte Leistungsniveau von Athlet zu Athlet unterschiedlich sind, ergibt sich auf der Grundlage der realen, maximal möglichen Parametergestaltung ein Toleranzbereich, in dem gleich weite Sprünge auf hohem Niveau erreicht werden können.

Bei der Analyse der Absprungbewegungen liegt der Fokus auf der Umsetzung der Anfangsgeschwindigkeit in optimale Abflugparameter. Entscheidende leistungsbestimmende Einflussgrößen sind dabei grundsätzlich die Minimierung des horizontalen Geschwindigkeitsverlusts und die Optimierung des vertikalen Geschwindigkeitsgewinns. Wie die Ergebnisse zeigen, hängen diese Größen für den beschriebenen Leistungsbereich stark voneinander ab. Wenn auch hier rein mechanisch kein Zusammenhang zwischen diesen Parametern besteht, zeigen die Ergebnisse der untersuchten Athletengruppe jedoch, dass sich beim Erzeugen von zusätzlicher Vertikalgeschwindigkeit ein Geschwindigkeitsverlust in horizontaler Richtung ergibt. Auf dieser Grundlage dieses Wirkungsverhältnisses kann die anfängliche Frage hinsichtlich der individuellen sportlichen Technik und der möglichen Technikvarianten erklärt werden.

Die Klassifikation von Sprungtypen zeigt technische Lösungsstrategien für diesen Toleranzbereich für männliche Kaderathleten. Die abgeleiteten und bewerteten Sprungtypen veranschaulichen modellhaft, mit welchen Strategien im Umlenkprozess gleiche Sprungweiten erreicht werden können.

Die Identifikation von Stärken und Schwächen und die Bewertung von Sprungleistungen sind demzufolge immer relativ, denn sie richten sich nach bestimmten Vergleichswerten und Normen für die technische Bewegungsaufgabe. An den intraindividuellen Streuungen der Absprungparameter von Sprung zu Sprung wird darüber hinaus einerseits die Schwierigkeit erkennbar, die Leistungen eines Athleten zu beurteilen und andererseits eine ideale Ausprägung der relevanten Einflussgrößen für den einzelnen Athleten individuell auf sein Optimum hin abzustimmen.

4.8 Leistungsentwicklung einer Nachwuchsathletin über drei Jahre

Von einer Athletin wurde anhand von elf Messterminen über den Verlauf von drei Jahreszyklen eine Längsschnittuntersuchung durchgeführt. Dabei wurden Weitsprünge aus dem kurzen, dem mittleren und dem Wettkampfanlauf hinsichtlich der relevanten, leistungsbestimmenden Parameter intraindividuell verglichen. Zunächst wurde gezielt nach Parametern gesucht, die die Leistungsentwicklung innerhalb einer Saison prägnant beschreiben. Anhand der aufgezeichneten Sprünge wurde die Entwicklung der Nachwuchsathletin über drei Jahre beobachtet und analysiert, welche Technik- und Bewegungsmerkmale die Leistungsentwicklung erklären können.

Voraussetzung für die Analyse von Veränderungen biomechanischer Parameter ist, dass dem Entwicklungsverlauf auch eine stetige Leistungssteigerung zugrunde liegt. Im Rahmen der begleitenden Leistungsdiagnostik steigerte die Athletin ihre Leistung bei den Weitsprüngen aus dem mittleren Anlauf von 5.45m auf 6.00m und im Wettkampfanlauf von 5.70m auf 6.10m. Für die Sprünge aus dem kurzen Anlauf, die als Zubringerleistung betrachtet werden, konnte eine Weitensteigerung über 1.05m ($W_{min} = 4.80\text{m}$, $W_{max} = 5.85\text{m}$) erreicht werden. Abb. 4.41 veranschaulicht die Leistungsentwicklung an den effektiven Sprungweiten W .

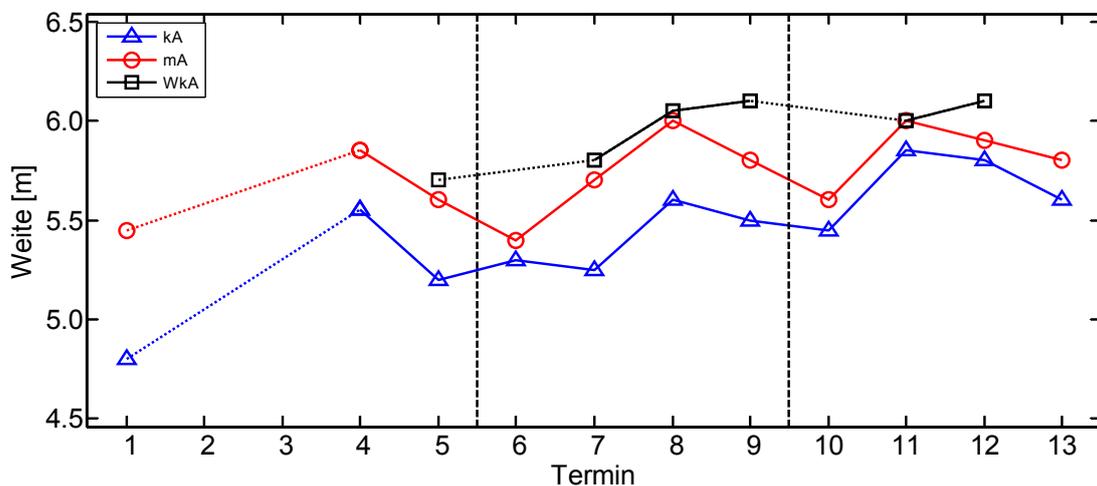


Abb. 4.41: Sprungweiten W aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Die Termine 1 bis 5 umfassen die Leistungsdiagnosen der ersten, 6 bis 9 die der zweiten und 10 bis 13 die der dritten Saison (siehe Abb. 4.1). Die Termine 1, 6 und 10 fanden

jeweils im Herbst zum Saisonbeginn statt, die Termin 5, 9 und 13 zum Saisonhöhepunkt im Juli. Auffallend ist, dass die Saisonbestleistungen der Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf jeweils zum Termin im April erreicht wurden.

Zum eigentlichen Saisonhöhepunkt fallen die Sprungweiten aus dem mittleren Anlauf etwas geringer aus. Diese Beobachtung lässt sich jedoch nicht für die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf bestätigen. In der zweiten Saison ist eine Steigerung um 0.30m festzustellen. Die „Einbrüche“ bei den Sprüngen aus den mittleren Anläufen haben verschiedene Ursachen. Da die Trainings- und Wettkampfbelastungen zum Saisonhöhepunkt oft größer sind als innerhalb der Saison, können die Diagnostikergebnisse vor allem durch Ermüdungseffekte aufgrund zusätzlicher, spezieller Trainingseinheiten in der entsprechenden Trainingswoche beeinflusst sein. Diese Vermutung entsteht insbesondere bei der Analyse der Anlaufgeschwindigkeiten aus dem zweiten Lichtschrankenintervall v_{LS2} , die in Abb. 4.42 dargestellt sind.

Über die drei Jahre sind tendenziell sowohl innerhalb der Saison als auch über den Gesamtverlauf Geschwindigkeitssteigerungen für alle drei Anlaufdistanzen festzustellen. In den ersten beiden Saisons werden im Juli geringere Anlaufgeschwindigkeiten für die Sprünge aus dem kurzen und mittleren Anlauf gemessen, was die kleineren Sprungweiten erklärt. Für den Wettkampfanlauf bestätigt sich dies jedoch nicht.

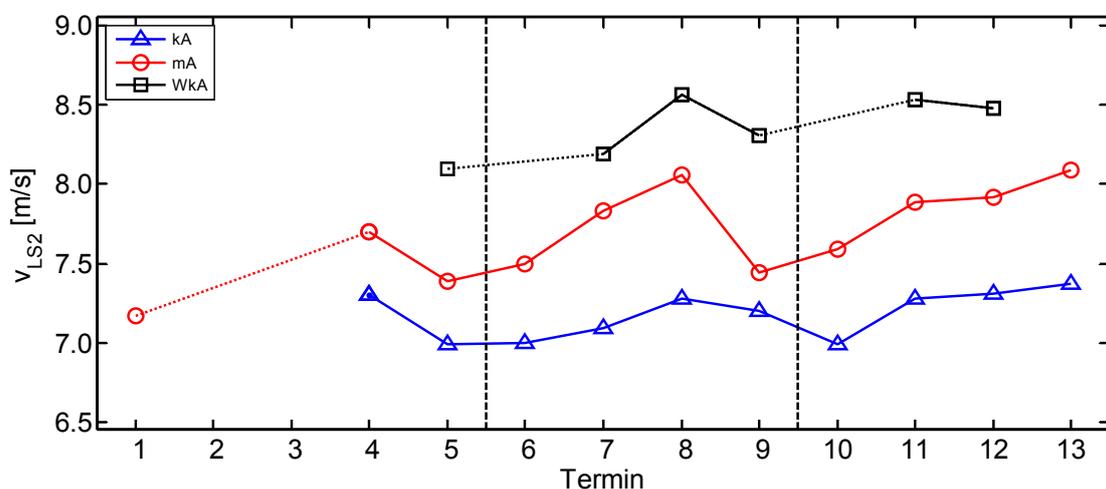


Abb. 4.42: Anlaufgeschwindigkeiten v_{LS2} aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Im Mittel unterscheiden sich die Anlaufgeschwindigkeiten der kurzen Anläufe (M_{kA} : $v_{LS2} = 7.18\text{m/s} \pm 0.15\text{m/s}$) von den mittleren (M_{mA} : $v_{LS2} = 7.69\text{m/s} \pm 0.3\text{m/s}$) um 0.5m/s.

Die Wettkampfanläufe sind nochmal um etwa 0.7m/s schneller als die mittleren (M_{WkA} : $v_{LS2} = 8.36\text{m/s} \pm 0.19\text{m/s}$).

Bei der Betrachtung der Abfluggeschwindigkeiten, die letztlich die Qualität des Umlenkens widerspiegeln, zeigen sich wie bei der Anlaufgeschwindigkeit v_{LS2} etwa parallele Kurvenverläufe. Die Gesamtabfluggeschwindigkeiten werden aus allen drei Anlaufdistanzen tendenziell größer, wie Abb. 4.43 zeigt.

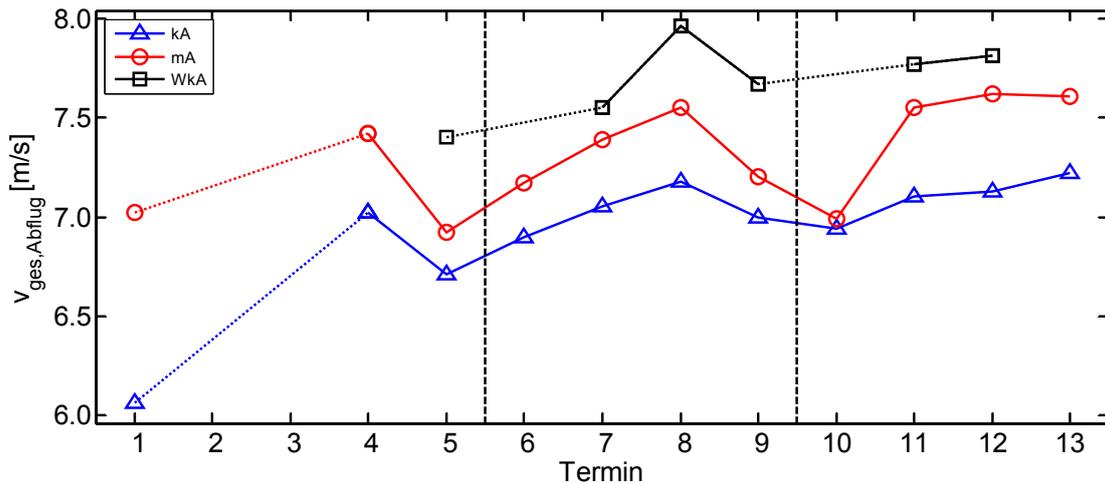


Abb. 4.43: Gesamtabfluggeschwindigkeit $v_{ges,Abflug}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Um zu beurteilen, ob das Umlenken der horizontalen Anlaufgeschwindigkeit innerhalb des Saisonverlaufs oder über die drei Jahre effektiver gestaltet wird, sich also neben der Verbesserung der Anlaufgeschwindigkeit eine Verbesserung der Absprungtechnik nachweisen lässt, wurden die Absprungposition und die Ökonomie der Sprünge bewertet.

Hinsichtlich der Absprungposition zeigen sich zunächst unabhängig vom Saisonverlauf tendenziell kleiner werdende Stemmwinkel (siehe Abb. 4.44). Beispielsweise wurde bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf bei Termin 5 ein Winkel von $\alpha_{Stemmen} = 24.3^\circ$ und bei Termin 11 von $\alpha_{Stemmen} = 21.8^\circ$ gemessen. Bei Sprüngen aus dem mittleren und kurzen Anlauf streuen die Stemmwinkel mehr, bestätigen aber dennoch diesen Trend. Die Körperschwerpunkthöhen H_{KSP} , die hier nicht gesondert dargestellt werden, schwanken zwischen 0.91m und 0.95m, weisen aber gegenüber dem Stemmwinkel keinen Trend auf. Die Kniewinkel zum Stützbeginn zeigen bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf ebenfalls keinen eindeutigen Trend, scheinen aber beim mittleren und kurzen Anlauf durch den Einfluss der Werte von Termin 4 etwas kleiner zu werden. Sieht man von der

Streuung der beiden Winkel ab, so deutet sich eine Veränderung der Anfangsposition der Athletin (ab Termin 4) an.

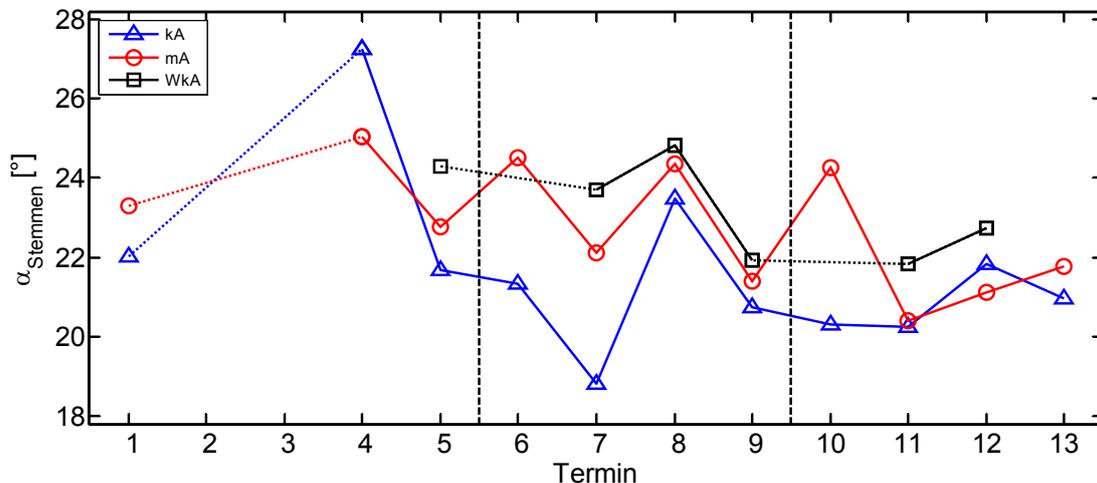


Abb. 4.44: Stemmwinkel $\alpha_{Stemmen}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Zu den jeweiligen Messzeitpunkten lassen sich die kleinsten Stemmwinkel in der Regel für die Sprünge aus dem kurzen Anlauf messen, die aus dem Wettkampfanlauf sind meist am größten.

Hinsichtlich der Beugephase des Sprungbeins wurden in den bisherigen Ergebnissen für die kleinsten Kniewinkel und die Kniewinkeländerung in der Umlenkphase individuell typische Streubereiche festgestellt. Angesichts eines konstanten Trainingsprozesses über drei Jahre ist darüber hinaus zu erwarten, dass durch die Veränderung und Anpassung der Muskulatur und des Sehnen-Bandapparats bessere Grundlagen für die exzentrische Phase geschaffen werden. Diese Trainingsanpassungen tragen im Normalfall – auch bereits bei Nachwuchsathleten – zu einer größeren Steifigkeit des Sprungbeins bei.

Was das Beugen des Sprungbeins bis zum kleinsten Kniewinkel anbelangt, zeigen sich am Entwicklungsverlauf der kleinsten Kniewinkel in der Umlenkbewegung und der Kniewinkeländerung zwei Tendenzen: Bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf ist der kleinste Kniewinkel in der Beugephase (im Bereich von $\alpha_{Knie,min}$: 126.1° bis 132.0°) relativ stabil, hingegen wird die Kniewinkeländerung über den Gesamtverlauf betrachtet dagegen geringer (siehe Abb. 4.45).

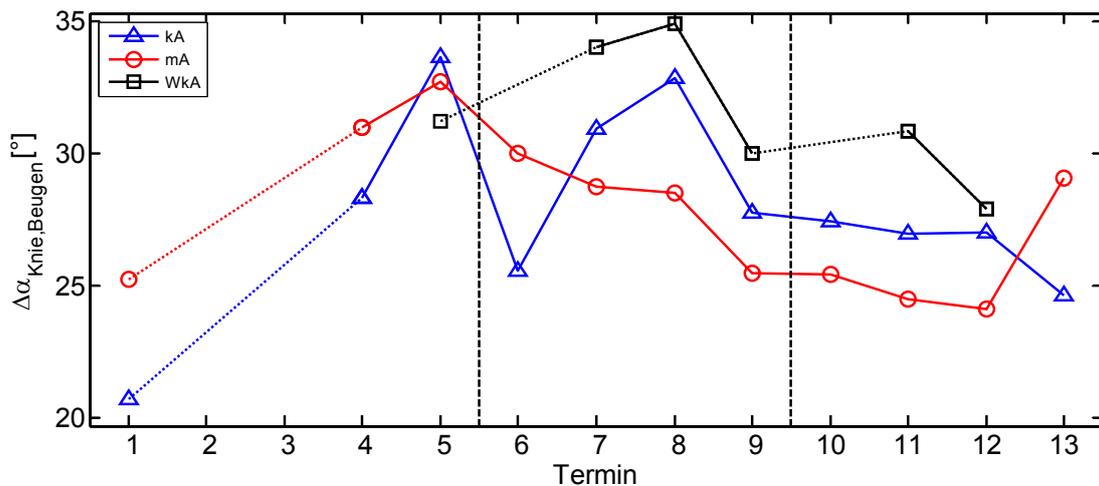


Abb. 4.45: Kniewinkeländerung des Sprungbeins beim Absprung $\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Zwar streuen die Werte für den kleinsten Kniewinkel bei den Sprüngen aus dem kurzen und dem Wettkampfanlauf stärker, und bei der Kniewinkeländerung sind ähnliche Streuungen zu vermerken. Entsprechende Auswirkungen ließen sich aber stellenweise bereits bei den kinematischen Parametern der untersuchten männlichen Kaderathleten feststellen (siehe Kapitel 4.2.1) und erklären sich durch vereinzelt weniger gut gelungene Sprünge.

Bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf zeigt sich der Trend für ein geringeres Nachgeben im Knie vor allem an den Einzelwerten der Sprünge in der zweiten und dritten Saison. Die Streuung der Parameter bei den Sprüngen aus dem kurzen Anlauf ist möglicherweise dadurch bedingt, dass das Umlenken intuitiv über mehr Beuge-Streckbewegung angesteuert wird. Eine solche ist bei geringeren Anlaufgeschwindigkeiten eher realisierbar und bewirkt größere vertikale Abfluggeschwindigkeiten und somit größere Sprungweiten.

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde, können Leistungssteigerungen durch unterschiedliche Strategien erreicht werden. Größere Weiten sind durch eine Steigerung der Anlaufgeschwindigkeit, über geringere Verluste der Horizontalgeschwindigkeit oder durch mehr vertikalen Geschwindigkeitsgewinn möglich. Im Falle der Nachwuchsathletin ist gerade bei den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf eine Veränderung in der horizontalen Geschwindigkeitsreduktion festzustellen (Abb. 4.46), ihr gelingt es das horizontale Bremsen zu reduzieren. Diese Entwicklung ist anhand der Sprünge aus dem mittleren Anlauf jedoch weniger zu erkennen.

Für die vertikale Geschwindigkeitsänderung ist kein klarer Trend festzustellen. Das Umlenken in vertikale Richtung gelingt stellenweise bei den Sprüngen aus dem mittleren Anlauf gut (Termin 8 und 10), geht dann allerdings stark mit horizontalen Bremswirkungen einher. Während beispielsweise beim Sprung zum Termin 8 eine Weite von $W = 6.00\text{m}$ erreicht wird, ergeben sich beim Sprung zum Termin 9 nur $W = 5.80\text{m}$, wobei hier allerdings die Anlaufgeschwindigkeit ($v_{LS2} = 7.59\text{m/s}$) geringer ist. Möglicherweise ließ sich das vertikale Beschleunigen deshalb besser umsetzen (siehe Abb. 4.47).

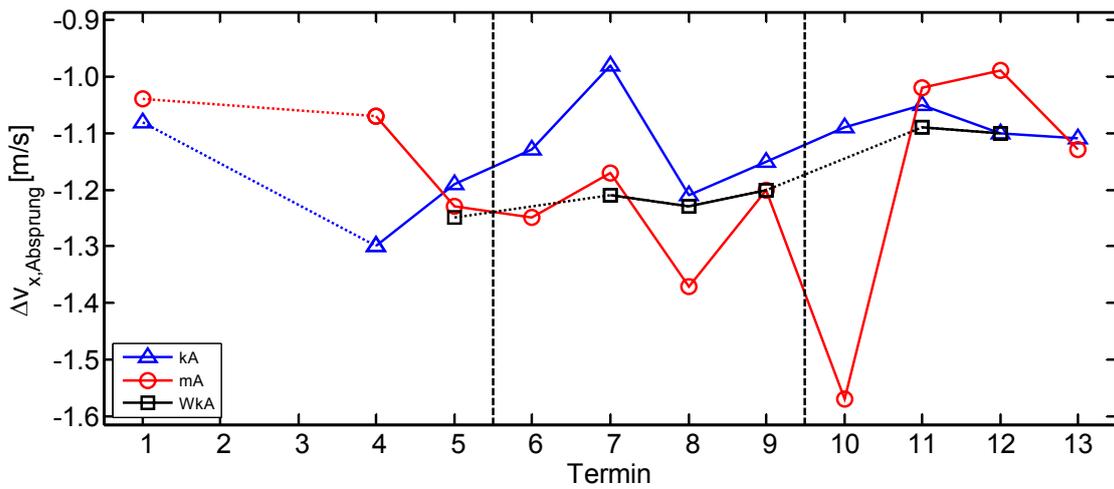


Abb. 4.46: Horizontale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{x, \text{Absprung}}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

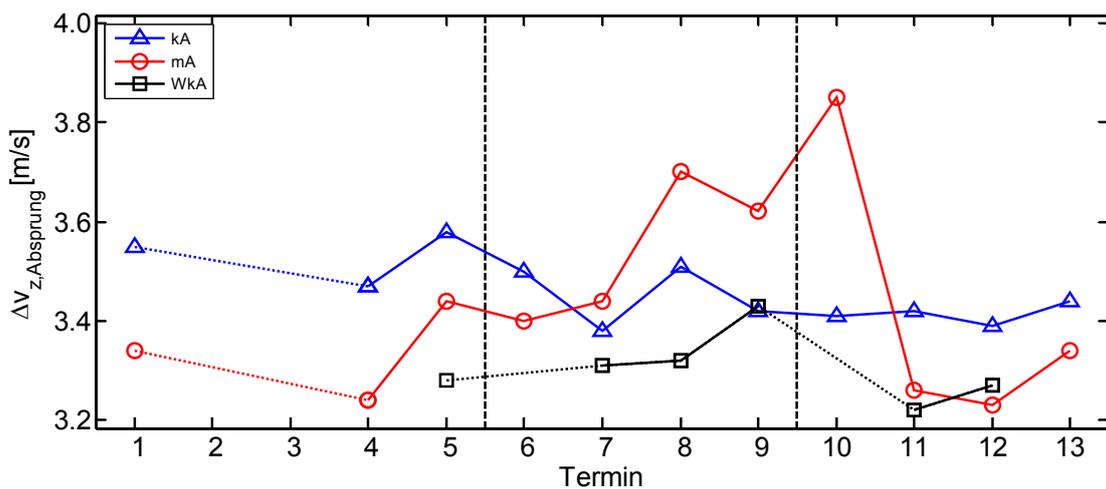


Abb. 4.47: Vertikale Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_{z, \text{Absprung}}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Der Absprunquotient zeigt, dass sich die Qualität der Sprungleistungen über den Verlauf der drei Jahre verbessert hat. Die Quotienten werden sowohl für die Sprünge aus dem Wettkampfanlauf, als auch für die aus dem mittleren und kurzen Anlauf größer (siehe Abb. 4.48). Die besten Verhältnisse von vertikaler Abfluggeschwindigkeit und horizontaler Geschwindigkeitsänderung lassen sich für die Sprünge aus dem kurzen Anlauf berechnen, für den Wettkampfanlauf hingegen ergeben sich durchgängig schlechtere Verhältnisse. Der Quotient verdeutlicht auch hier, dass aus hohen Geschwindigkeiten schlechter umgelenkt werden kann.

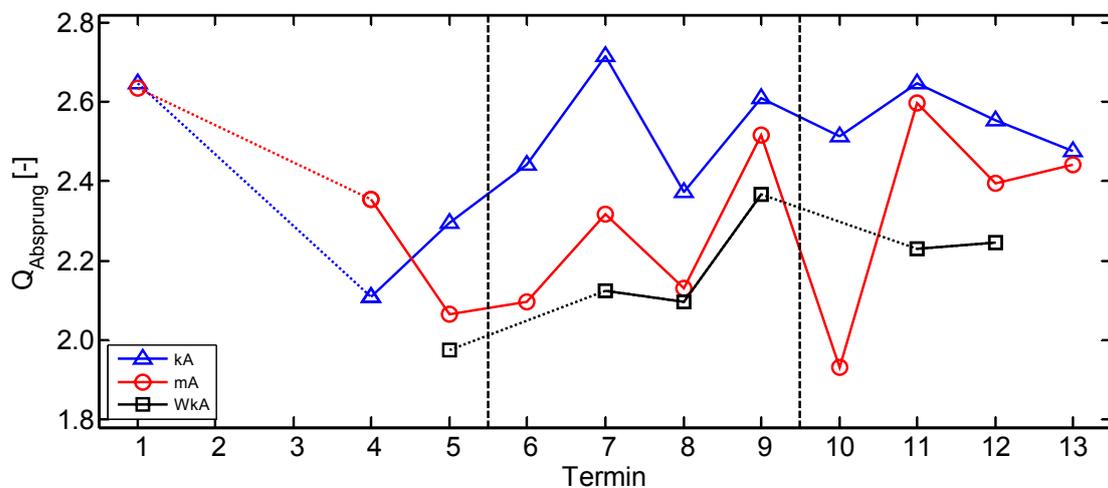


Abb. 4.48: Absprunquotient $Q_{Absprung}$ bei Weitsprüngen aus dem kurzen kA, dem mittleren mA und dem Wettkampfanlauf WkA einer Athletin über den Verlauf von drei Jahren.

Zusammenfassend lassen sich aus der Analyse des Entwicklungsverlaufs am Beispiel der Athletin zwei Schlüsse ziehen: Prinzipiell werden gute und hervorragende Sprungleistungen immer durch die Kombination von mehreren überdurchschnittlich ausgeprägten, leistungsbestimmenden Merkmalen erreicht.

Diese Sprünge werden in der Regel eher um den Saisonhöhepunkt und auf der Grundlage einer guten Technikausbildung erreicht. Die extreme Ausprägung bestimmter Parameter bringt jedoch häufig mit sich, dass sich andere Parameter dadurch schlechter ausprägen. Die Streuung der Parameter ermöglicht letztlich Rückschlüsse auf die Varianz der Bewegungsausführung und zeigt die Schwierigkeit, gute Leistungen zu reproduzieren.

Während einige Parameter relativ unverändert in einem bestimmten Varianzbereich streuen, lassen sich dennoch für bestimmte Parameter über den Entwicklungsverlauf Veränderungen nachweisen, die letztlich systematisch zur Verbesserung der Sprungleistung beitragen. Dazu zählen beispielsweise die schnelleren Anlauf-

geschwindigkeiten, die größeren Gesamtabfluggeschwindigkeiten und das Bremsen der horizontalen Geschwindigkeit. Die Verbesserungen hinsichtlich der vertikalen Abfluggeschwindigkeit und des reduzierten Bremsens spiegeln sich auch in den größer werdenden Abspungquotienten wider.

Kapitel 5

Diskussion

Auf der Grundlage eines umfangreichen Datensatzes von kinematischen und dynamischen Parametern konnten in dieser Arbeit Phänomene und Zusammenhänge von leistungsbestimmenden Kriterien der Absprunghase des Weitsprungs aufgezeigt werden. Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen einer umfangreichen Leistungsdiagnostik mit Kaderathleten aus dem Bereich des leichtathletischen Sprungs. Die Analysen basieren somit auf Weitsprüngen mit hohem technischem Niveau. Die Erkenntnisse und Ergebnisse sind demnach primär für den Leistungssport repräsentativ.

Bei der systematischen Datenerhebungen mit vielen Diagnoseterminen ergeben sich allerdings auch Schwierigkeiten, beispielsweise im Bereich der Standardisierung und bei der Rekrutierung der Athleten. Im Folgenden sollen deshalb verschiedene methodische Aspekte und Vorgehensweisen sowie die Einordnung der Ergebnisse nochmals übergreifend diskutiert werden.

5.1 Methodendiskussion

Auswerteaufwand

Neben der außergewöhnlich großen Anzahl der ausgewerteten Weitsprünge, zeichnet sich die Arbeit durch die hohe Qualität kinematischer Parameterberechnung (aus dem Ganzkörpermodell bei 100fps) sowie die durchgehende Messung der Bodenreaktions-

kräfte beim Absprung aus. Diese Datenerfassung erforderte sowohl für die Organisation der Messungen als auch für die Datenauswertung einen außergewöhnlich hohen Aufwand, der für Routineanalysen in dieser Form nicht geleistet werden kann.

Für die Datenerfassung und -bearbeitung wurde im Vorfeld der Untersuchungen eigens ein Programm geschrieben, das im Laufe der ersten Messeinheiten auch erweitert und weiterentwickelt wurde. Die Datenerfassung und -auswertung von insgesamt 265 Weitsprüngen aus verschiedenen Anlaufdistanzen – für das letzte Messjahr wurden zwei weitere Kameras zur Analyse des Anlaufs eingesetzt, bei der 3D-Auswertung wurde mit sechs Kameras gemessen – benötigte insgesamt etwa 1400 Zeitstunden. Dazu kam ein Freiluftmesstermin während eines Wettkampfes sowie die Auswertung der zusätzlich erfassten Zubringerleistungen. Darüber hinaus wurden an den 13 Messterminen für den Aufbau der Messgeräte und die Durchführung der Messungen mindestens fünf Testhelfer benötigt, Aufbau, Messung und Abbau dauerten jeweils acht Stunden.

Auswahl der Stichprobe

Während für die Datenerhebung, den Messaufbau und Messplatz sowie die Versuchsdurchführung zu allen Terminen standardisierte Bedingungen vorlagen, mussten hinsichtlich der teilnehmenden Weitspringer oft Ausfälle einzelner Athleten in Kauf genommen werden. Die Leistungsdiagnosen sollten an vier über die Saison verteilten Terminen stattfinden, für die im Vorfeld jeweils grobe Zeitfenster vereinbart wurden. Um den individuellen Wettkampf- und Trainingsplänen gerecht zu werden, wurden die Termine mit dem Trainer kurzfristig so abgestimmt, dass möglichst viele Athleten an den Messterminen teilnehmen konnten. Dennoch liegen aufgrund von Verletzungsausfällen oder Terminüberschneidungen für manche Termine weniger Daten vor. Und obwohl dass die Diagnosetermine vom Trainer in den Wochentrainingszyklus der Weitspringer eingeplant wurden, war es wegen individueller Trainingsplanungen nicht immer möglich, dass die Athleten vollständig ausgeruht zur Diagnose erscheinen konnten.

Die Weitsprünge aus dem Wettkampfanlauf konnten nicht zu allen Terminen durchgeführt werden, da mitunter die Belastungen gerade in der Vorbereitungsphase noch zu groß waren oder die Anlaufgeschwindigkeiten noch nicht adäquat umgesetzt werden konnten. Aus diesem Grund konnten nur Sprünge aus dem mittleren Anlauf ganzjährig gemessen werden. Hinzu kommt, dass über den Zeitraum von drei Jahren einige Athleten die Trainingsgruppe verlassen haben, andere hingegen sind erst nach einem oder zwei Jahren zur Gruppe hinzugestoßen.

Prinzipiell wurden bei der Datenerhebung mindestens zwei gültige Sprünge aus dem kurzen, dem mittleren und dem Wettkampfanlauf aufgezeichnet. Für die männlichen Kaderathleten wurden alle gültigen Sprünge ausgewertet und berücksichtigt. Bezüglich der Datenerhebung ergaben sich hierbei jedoch zwei Schwierigkeiten: Zum einen mussten die Athleten für einen gültigen Sprung die Kraftmessplatte mit dem ganzen Fuß vollständig treffen, was nicht immer gelang. Zum anderen traten nach mehreren Versuchen Ermüdungseffekte auf. Zwar lässt sich nicht bestätigen, dass beispielsweise der vierte oder fünfte Sprungversuch aus dem Wettkampfanlauf schlechter ist als der erste. Dennoch hätten beispielsweise mit einer größeren Kraftmessplatte insgesamt mehr gültige Sprünge für die Untersuchungen gewonnen werden können.

Datenerfassung

Die Genauigkeit der Messungen muss hinsichtlich folgender Punkte diskutiert werden: Die kinematischen Auswertungen erfolgten anhand manuell digitalisierter Daten. Hierbei ist bereits beim Anbringen der Marker auf der Kleidung mit Fehlern zu rechnen. Während der Bewegung ergeben sich Ungenauigkeiten, weil die Marker einerseits durch die Kleidung, andererseits aufgrund der Verschiebung der Haut insbesondere beim Aufprall verrutschen. In einigen Fällen wurden Marker auch während des Sprungs verloren.

Um die Messfehler möglichst klein zu halten, wurde für die Datenaufnahme geeignete (vor allem einfarbige, dunkle) Kleidung vorgeschrieben und die Markerposition nach den Sprüngen kontrolliert. Das manuelle Abtasten wurde immer von der selben erfahrenen Person durchgeführt, so dass eine routinierte Ausführung mit Gespür für die zu interpolierenden Gelenkpunkte gewährleistet war. Für die Fehlerabschätzung bei der Aufnahme und Verarbeitung digitaler Daten ist nach Woznik (1992) und Schöllhorn (1995) für das Abtasten markierter Gelenkpunkte durch einen erfahrenen Bearbeiter mit einem maximalen Fehler von 11mm und einem mittleren Fehler von 5mm zu rechnen.

Die aufgezeichneten Weitsprünge zu den jeweiligen Messzeitpunkten wurden gleichwertig behandelt, es wurde also nicht zwischen Sprüngen aus der Vorbereitungs- oder der Wettkampfperiode unterschieden. Allerdings wurden nur Sprünge mit einer Mindestweite berücksichtigt, so dass ein gewisses Niveau garantiert werden konnte. Grund für diese Datenselektion war, dass einige Athleten zu den Messterminen im Herbst aus einem erholten Trainingszustand heraus oftmals sehr gute Sprungleistungen abrufen konnten, diese aber beispielsweise aufgrund von Verletzungen nach der Vorbereitungsphase nicht wieder erreichten. Die Mindestweiten für einen guten Sprung

dieser Leistungsklasse wurden dabei anhand von Erfahrungswerten festgelegt. Es wurden dadurch aber nur wenige Sprünge ausselektiert.

Für die Beschreibung der unterschiedlichen Typen wurden exemplarisch Sprünge ausgewählt, die das beschriebene und definierten Verhalten bzw. das Absprungmuster deutlich aufzeigen konnten. Die Auswahl der Beispiele beruhte auf dem Vergleich aller Sprünge.

Die Weitsprünge der weiblichen Athletinnen (abgesehen von der in der Längsschnittstudie untersuchten Athletin) wurden für die Ergebnisdarstellung nicht berücksichtigt. Dies liegt daran, dass die Sprünge von Männern und Frauen separat untersucht werden müssen und für die Weitspringerinnen so zu wenige Messdaten für eine aussagekräftige Ergebnisinterpretation vorlagen.

Parameterberechnung

Die kinematische Parameterberechnung geht auf eine Bildfrequenz von 100 Bilder pro Sekunde zurück. Für den Absprung liegen also 12 Bilder vor, anhand derer die Absprungbewegung zunächst beschrieben wurde. Da sich bei Geschwindigkeiten des Körperschwerpunkts von 10m/s ein Markerpunkt von Bild zu Bild etwa um 10cm (je nach Teilkörpergeschwindigkeit mehr oder weniger) „blind“ bewegt, ist in den Ergebnissen bezüglich der Positions- und Winkelberechnungen, insbesondere von Knie- und Hüftwinkel beim Einstieg, Körperschwerpunkthöhe, Stemmweite und -winkel, mit Ungenauigkeiten zu rechnen.

Um die Zeitpunkte des Auftreffens und des Lösens, die aus den deutlich höherfrequenten Kraftdaten (3kHz) entnommen wurden, möglichst genau auf die kinematischen Daten übertragen zu können, wurden die Positionsverläufe zwischen den existierenden Bildpunkten interpoliert um die Einstiegs- und Abflugparameter zu bestimmen. Für eine Fehlerabschätzung wurde die Interpolation mit einer komplexeren Spline Approximation verglichen. Hierbei ergaben sich keine nennenswerten Unterschiede. Für die Kniewinkel ergab sich ein maximaler Unterschied von 0.2° . Für die Positionsverläufe wie die des Körperschwerpunkts ist die Differenz vernachlässigbar klein.

Die Position des kleinsten Kniewinkels wird aus dem Bild berechnet, das den kleinsten Winkel darstellt. Ob das dargestellte Bild nun den tatsächlich kleinsten Winkel zeigt, oder ob innerhalb der vorangehenden oder nachfolgenden Zeitintervallen ein kleinerer Wert erreicht wird, kann auch mit einer Interpolation oder Approximation nur bedingt abgeschätzt werden. Um die Bewegung des Sprungbeins dennoch genauer betrachten zu können, wurden nachträglich zwischen die erfassten Gelenkpunkte je fünf weitere

Koordinatenpunkte für das Knie, die Ferse und die Hüfte mit der Spline Approximation gefittet. Somit konnten die Positions- und Winkelverläufe des Sprungbeins besser dargestellt und mit den Kraftverläufen genauer verglichen werden.

Die Datenaufnahme basiert auf 2D-Analysen, bei der die Gelenkpunkte zweiseitig digitalisiert wurden. Dieses Verfahren hebt sich daher in Bezug auf die Genauigkeit und den Messaufwand von den meisten anderen Studien ab (vgl. Tab. 2.1). Wie in Kapitel 3.3.3 in Abb. 3.11 grafisch gezeigt wurde, ist hinsichtlich der kinematischen Daten zwischen den 2D und 3D Aufzeichnungen – minimal durch die Transversalbewegung des Knies des Sprungbeins, eher durch die Querbewegungen der Arme und des Schwungbeins – mit kleinen Differenzen zu rechnen. Da in dieser Arbeit der Fokus auf der Analyse des Sprungbeins lag, sind die 2D-Analysen hinreichend genau.

Etwas größere Fehler sind vermutlich beim Verschieben und auch beim Positionieren der Marker zu erwarten. Das Abtasten der Marker wird dann ungenau, wenn diese in gebeugten Gelenken nicht mehr vollständig sichtbar sind. Für die Sprünge der männlichen Athleten wurden deshalb die Segmentlängen von Oberschenkel und Unterschenkel über den Verlauf der Stützphase kontrolliert.

Analog wurde bei der dynamischen Datenauswertung auf die Analyse der Querkräfte verzichtet. Hinsichtlich der Querkräfte zeigten sich für die Sprünge der männlichen Kaderathleten durchschnittliche Maximalauslenkungen von $F_{y,Max} = 697\text{N}$ (nach rechts) und $F_{y,Max} = 837\text{N}$ (nach links). Die größte vorkommende maximale Querkraft lag bei $F_{y,Max} = 1400\text{N}$, die kleinste bei $F_{y,Max} = 70\text{N}$. Typischer Weise werden die Transversalkräfte, die mit dem Fußaufsatz in eine Richtung entstehen, durch darauf folgende, ausgleichende Gegenkräfte (also in die entgegengesetzte Richtung) über den Stützzeitraum reguliert. Die Integration der Querkräfte ergab entsprechend einen relativ kleinen mittleren Gesamtkraftstoß von $S_y = 6.25\text{Ns}$. Die Geschwindigkeitsänderung in y-Richtung beträgt dabei etwa 0.1m/s .

Für einige Parameter werden in der Literatur unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten beschrieben. Dies betrifft zum einen die Positionsweiten zum anderen den Hüft- oder Rumpfwinkel. Die Differenzen in der Berechnung von Positionsweiten gehen auf unterschiedliche Gelenkpunkte zurück, was sich vor allem auf die Stemmposition am Absprungbalken auswirkt. Während Hay & Nohora (1990) zur Berechnung der Stemmpositionsweite (auch für den letzten Schritt) die Distanz von der Fußspitze zum Lot des Körperschwerpunkts heranziehen, wird beispielsweise bei der Bundesleistungsdiagnostik (siehe Tab. 2.6) der Position aus der Distanz von der Ferse und dem Lot des Körperschwerpunkts ermittelt. Ein Vergleich ist nur für gleiche Berechnungsgrundlagen

möglich. Da sich Hay & Nohora auf die letzten Anlaufschritte fokussieren und die Berechnungen auf die Stemm- und Absprungpositionsweiten ausgerichtet sind, ist ein fixer Punkt für beide Positionen notwendig. Für leistungsdiagnostische Zwecke ist die Berechnung des Stemmwinkels über den Knöchel oder die Ferse genauer und sinnvoller. In dieser Arbeit wurde die Stemmpositionsweite über die Gerade vom Körperschwerpunkt zum Fersenmarker, die Abflugposition über die Gerade vom Körperschwerpunkt zur Fußspitze bestimmt. Für den Winkelverlauf von Stützwinkel und Kraftangriffswinkel wurde außerdem für noch präzisere Ergebnisse der Knöchelmarkerpunkt berücksichtigt.

Statistische Datenverarbeitung

Anhand des durch die Daten abgesteckten Leistungsbereichs der Athleten wurden potentielle Abhängigkeiten für die relevanten Parameter beschrieben (siehe Kapitel 3.3.3). Dazu wurden Korrelationen zwischen den 45 Variablen (Absprungparameter) berechnet, die auf je 33 Messwerten (Sprüngen) beruhen. Da zwei Athleten mehrere Sprünge mit in die Stichprobe einbringen (Athlet 1: $n_{WkA} = 12$, Athlet 2: $n_{WkA} = 8$), ist der Korrelationskoeffizient von diesen beiden geprägt. Über die Ergebnisse kann somit zwar ein Trend beschrieben werden, allgemeingültige Aussagen über die Stichprobe hinaus sind jedoch nicht möglich.

Für die Absprungparameter der Weitsprünge aus dem mittleren und dem Wettkampfanlauf wurden Mittelwertunterschiede mittels des t-Tests für unabhängige Stichproben berechnet (Signifikanzniveau von $p < 0.05$). Die Anzahl der Sprünge aus dem Wettkampfanlauf ($n = 30$) war dabei etwas kleiner als die aus dem mittleren Anlauf ($n = 35$). Außerdem konnten die Varianzen bei allen untersuchten Parametern als nahezu homogen angesehen werden (siehe Tab. 4.20). Die Normalverteilung konnte jedoch bei allen Parametern vorausgesetzt werden.

Sind sowohl die Stichprobenumfänge (wenn beide Stichproben $n < 50$ sind; vgl. Eckstein, 2008) als auch die Varianzen deutlich voneinander verschieden, dann ist mit mehr Fehldeutungen zu rechnen. Deshalb sind die Parameter mit Einschränkungen zu interpretieren. Allerdings besteht in der Literatur jedoch keinen Konsens, ab welcher Gruppengröße sich die Fehler wie stark auswirken.

5.2 Ergebnisdiskussion

Die Berechnung der Mittelwerte basiert auf einer Datenbasis, in die einige Athleten mehrere Werte als andere mit einbrachten. Somit sind die Mittelwerte, die Streuungen und damit die Standardabweichungen stark von den Parametern einzelner Athleten geprägt. Da der Mittelwert zudem – gerade bei kleineren Stichproben wie in dieser Arbeit – nur ein stochastisches Maß darstellt und die Streuungen lediglich einen Bereich festlegen, in dem Messdaten kumulieren, sollen die Mittelwertangaben nur als Beschreibung dieser speziellen Personengruppe verstanden werden.

Mittelwertvergleiche zwischen der analysierten Untersuchungsgruppe und anderen Leistungsgruppen, wie beispielsweise mit den Endkampfteilnehmern der Weltmeisterschaft (z.B. Müller & Brüggemann, 1998; Witters et al., 1992; Nixdorf & Brüggemann, 1990) oder Teilnehmern von Studentenmeisterschaften (z.B. Lees et al., 1992; Lees et al., 1994) sind nur dann aussagekräftig, wenn die Anzahl der untersuchten Personen bzw. der Sprünge und die jeweiligen Standardabweichungen in etwa gleich sind. Da dies für die in der Literatur beschriebenen Leistungsgruppen nicht der Fall ist bzw. die Fragestellungen und Messmethodiken der Untersuchungen andere waren als die dieser Arbeit, wurde auf eine direkte, vergleichende Gegenüberstellung verzichtet.

Voraussetzung für Ergebnisvergleiche mit anderen Untersuchungsergebnissen ist auch, dass der Datenerhebung ungefähr gleichen Bedingungen und Parameterberechnungen zugrunde liegt. Unterschiede in der Parameterberechnung können sich beispielsweise ergeben, wenn die kinematische Datenerhebung auf der Grundlage von 2D- oder 3D-Messungen erfolgt. Für die Bewegungen des Körperschwerpunkts in der y-Ebene wurden dabei bis zu 2cm gemessen, für die des Knies 3cm. Darüber hinaus wurden die Absprungbewegungen aus unterschiedlichen Kamerapositionen aufgezeichnet. Außerdem sind die 2D-Aufnahmen anderer Untersuchungen oft nur einseitig oder auch ohne Marker-setup digitalisiert. Die sich daraus ergebenden Tiefenfehler und die optische Verzerrung an den Bildrändern führen ebenfalls zu Abweichungen in den berechneten Parametern.

Kapitel 6

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden im Rahmen einer umfassenden komplexen Leistungsdiagnostik über drei Jahre zu 13 Messterminen leistungsbestimmende biomechanische Parameter der Absprungbewegung des Weitsprungs von weiblichen und männlichen Kaderathleten erfasst und untersucht. Für eine hochauflösende Datenerfassung wurde dafür ein Messplatz erstellt. Die kinematischen Daten wurden als 2D-Videoaufnahmen mit zwei Hochfrequenz-Videokameras auf Höhe des Absprungbalkens zweiseitig aufgezeichnet. Die Erfassung der Bodenreaktionskräfte erfolgte dazu zeitlich synchronisiert mit einer im Absprungbrett integrierten Kraftmessplatte.

Im Fokus der biomechanischen Bewegungsanalyse stand die Absprungbewegung, die sich auf zwei Untersuchungsbereiche bezog. Zum einen wurde die Absprungbewegung anhand von relevanten Parametern Individuen-übergreifend analysiert, um aufzuzeigen welche mechanischen Zusammenhänge und Phänomene der Bewegung zugrunde liegen. Zum anderen wurden gleichzeitig individuelle Technikanalysen und Einzelfallanalysen durchgeführt, wobei individuelle Lösungsmöglichkeiten für gleiche Sprungweiten voneinander abgegrenzt und definiert werden konnten.

Mit der Verknüpfung von kinematischen und dynamischen Zeit-Verläufen konnte festgestellt werden, dass nach dem Auftreffen (innerhalb der ersten 0.02s), wenn die größten Belastungen auf das Sprungbein wirken, die Kniewinkeländerung am geringsten und somit die Steifigkeit am größten ist. Nachdem die maximalen horizontalen und vertikalen Kräfte abgebremst wurden ($v_{KSP} = 0\text{m/s}$) und der Körperschwerpunkt seine tiefste Position erreicht hat, lässt die Steifigkeit des Sprungbeins (gemessen über die

größer werdende Kniewinkeländerung bei reduzierter Reaktionskraft) nach. Anhand der Kniepositionsverläufe und am steigenden Körperschwerpunktsverlauf ist zu erkennen, dass die Beuge-Bewegung von der rotatorischen Bewegung des Sprungbeins über den Fußaufsatz überlagert wird. Der kleinste Kniewinkel wird etwa beim Erreichen des zweiten vertikalen Kraftmaximums gemessen, im Mittel 0.05s nachdem der Körperschwerpunkt seine tiefste Position erreicht hat.

Da in vertikaler Richtung eine stetig positive Beschleunigung vorliegt und mit dem Erreichen des tiefsten Kniewinkels bereits zwei Drittel der vertikalen Abfluggeschwindigkeit erzeugt sind, trägt die Streckbewegung des Sprungbeins (durch das Strecken von Knie und Fußgelenk) nur noch einen weiteren, aber geringeren Anteil zum Gewinn der vertikalen Abfluggeschwindigkeit bei. In horizontaler Richtung dominiert der Bremskraftstoß, der für eine große Gesamtabfluggeschwindigkeit möglichst klein ausfallen sollte. Für das Verhältnis von horizontalem Geschwindigkeitsverlust und vertikalem Geschwindigkeitsgewinn konnte anhand der untersuchten Stichprobe festgestellt werden, dass trotz der rein mechanisch betrachteten Unabhängigkeit der horizontalen und vertikalen Absprungparameter das Investieren in vertikale Abfluggeschwindigkeit statistisch nachweislich größere horizontale Geschwindigkeitsreduktion verursacht.

Trotz der Streuungen der kinematischen und dynamischen Absprungparameter konnte mit den Einzelfallanalysen festgestellt werden, dass sich für die jeweiligen Athleten typische Absprungmuster aufzeigen. Diese erwiesen sich über den Entwicklungsverlauf der drei Jahre als relativ stabil. Auf dieser Grundlage konnte für den technisch effizienten Lösungsbereich, entsprechend den zugrunde liegenden Strategien der einzelnen Athleten eine Klassifikation von Sprungtypen vorgenommen werden. Dabei hebt sich in der Umlenkbewegung Typ A ab, der sich über einen Beuge-Streck-Charakter mit dominierender Vertikalbewegung definiert, wenig Steifigkeit in Form von großer Kniewinkeländerung aufzeigt und damit zwar in vertikaler Richtung große Geschwindigkeitsgewinne erzielt, in horizontaler Richtung jedoch viel Geschwindigkeit abbremst. Die Absprungbewegung von Typ B kennzeichnet sich dadurch, dass das Umlenken der Geschwindigkeiten über einen langen Hebel, basierend auf einem steifen Sprungbein, erfolgt, womit einerseits geringere horizontale Geschwindigkeitsverluste, aber auch weniger große vertikale Geschwindigkeitsgewinne erreicht werden können. Typ C, der sich maßgeblich über die Horizontalbewegung definiert, weil er seine horizontale Anfangsgeschwindigkeit nur gering reduziert, in vertikaler Richtung allerdings auch nur geringe Geschwindigkeitsgewinne erzeugt, gestaltet seine

Absprungbewegung wie ein „Durchschieben“ der Anlaufgeschwindigkeit bei steifem Sprungbein.

Um die Effektivität der Umlenkbewegung zu quantifizieren, wurde ein Quotient zur Gütebestimmung berechnet. Dieser ist zwar unabhängig von der Anlaufgeschwindigkeit und korreliert auch nicht mit der Zielgröße, der Sprungweite. Als dimensionsloser Wert ist der Quotient aber über das Verhältnis von vertikaler Abfluggeschwindigkeit und horizontaler Geschwindigkeitsänderung ein Maßstab für die Qualität der Umlenkbewegung. In kleinen Quotienten findet sich Typ A, in mittleren Typ C und in großen Typ C wieder.

Für die Anfangsbedingungen bei Stützbeginn konnten bezüglich der Stemmposition (betrachtet über den Stemmwinkel und den Kniewinkel des Sprungbeins beim Fußaufsatz) unterschiedliche Möglichkeiten dargestellt werden, die letztlich auch die Ausgangsbedingungen für die jeweiligen Absprungtypen bilden.

Um Prognosen für Weitsprungleistungen treffen zu können, wurde mit der theoretisch berechneten Sprungweite anhand der berechneten Absprungparameter veranschaulicht, mit welchen Abflugbedingungen, also welchen horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten, gleiche Weiten erreicht werden können. Somit können mittels der individuellen Anfangsbedingungen und technischen Stärken oder mittels der individuellen Abflugparameter erreichbare Sprungweiten und Potentiale individuell abgeschätzt werden. Die erstellten Grafiken zeigen auch, welche Voraussetzungen und Dispositionen beispielsweise für 8m-Sprünge erforderlich sind.

Die Unterschiede der Absprungparameter aus dem mittleren und Wettkampfanlauf lassen auf den ersten Blick nur bedingt auf eine Vergleichbarkeit von Weitsprüngen mit unterschiedlichen Anlaufgeschwindigkeiten schließen. Die Dynamik von Sprüngen mit maximaler Anlaufgeschwindigkeit ist nicht vorbehaltlos mit der Dynamik von Sprüngen mit geringerer Anlaufgeschwindigkeit vergleichbar. Dennoch hat die hier vorgestellte Studie gezeigt, dass die Konstellation der wichtigsten biomechanischen Parameter bei den verglichenen unterschiedlichen Anlaufängen für die untersuchten Athleten größtenteils ähnlich ist.

Als evaluativen Beitrag zur Leistungsdiagnostik im Weitsprung wurden in einer vergleichenden Studie die Weitsprünge aus dem mittleren Anlauf den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass sich die Weitsprünge aus den unterschiedlichen Anlaufdistanzen in der Anfangsgeschwindigkeit und den horizontalen Abfluggeschwindigkeiten wohl von denen aus dem Wettkampfanlauf unterscheiden. Nachweisliche Unterschiede lassen sich außerdem auch für das erste vertikale

Kraftmaximum $F_{z,Max1}$, den vertikalen Kraftstoß $+S_z$, das horizontale Kraftminimum $F_{x,Min}$, für die horizontale Abfluggeschwindigkeit $v_{x,Abflug}$, für den Abflugwinkel α_{Abflug} sowie für den Quotienten $Q_{Absprung}$ berechnen. Hinsichtlich der kinematischen Parameter der Sprünge aus dem mittleren Anlauf, wie dem Stemmwinkel, dem Kniewinkel beim Fußaufsatz und beim Abflug sowie dem kleinsten Kniewinkel, zeigen sich jedoch größtenteils intraindividuelle Ähnlichkeiten zu den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf. Darüber hinaus können im mittleren Anlauf auch die individuellen Muster der einzelnen Weitspringer, analog zu den Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf, und die typischen Parameterausprägungen mit gewissen Abweichungen in den Kniewinkeln, Kniewinkelgeschwindigkeiten und den Kraftstößen erkannt werden. Für die trainingspraktischen Leistungsdiagnosen bedeutet das, dass die Sprünge aus dem mittleren Anlauf generell sowohl für die Technikanalysen als auch für Prognosen der Sprungleistungen eingesetzt werden können, da an ihnen sowohl die individuellen Absprungmuster als auch die Leistungsentwicklung über den Saisonverlauf festgestellt werden kann.

Mit einer Querschnittsanalyse über drei Jahreszyklen wurde darüber hinaus die Entwicklung der Weitsprungleistung einer Athletin aufgezeigt. An diesem Beispiel konnte veranschaulicht werden, welche Parameter sich über eine Zeitdauer von drei Jahren verändern und letztlich die individuelle Leistungssteigerung – von 5.70m auf 6.10m bei Sprüngen aus dem Wettkampfanlauf – begründen. Wie zu erwarten, steigerte sich die Anlaufgeschwindigkeit. Veränderungen der technischen Bewegungsausführung konnten tendenziell bei den kleineren Stemmwinkeln beobachtet werden. Die Trainingswirkungen des spezifischen Krafttrainings sind deutlich an der kleiner werdenden Kniewinkeländerung in der Absprunghase und somit an der größeren Steifigkeit des Sprungbeins zu erkennen. Dass sich beide Faktoren letztlich auf die Geschwindigkeitsänderungen auswirken, lässt sich zum einen in den tendenziell geringer werdenden horizontalen Bremswirkungen veranschaulichen sowie am größer werdenden Absprungquotienten.

Die Einzigartigkeit und gleichzeitig Besonderheit der Arbeit liegt in der Kombination von einerseits sehr präziser, umfangreicher aufwändiger und systematischer Datenerfassung über vier parallel geschaltete Messsysteme und andererseits an der Dichte der untersuchten Athleten hohen Leistungsniveaus, die über drei Jahreszyklen diagnostisch und wissenschaftlich begleitet wurden.

Durch die Kooperation von Wissenschaft und Leistungssport konnten somit nicht nur wissenschaftliche Fragestellungen beantwortet, sondern durch die an die Praxis angelehnte Forschung auch ein Beitrag für die Praxis im Leistungssport geliefert werden.

Literaturverzeichnis

- Ariel, G.B. *Scientific Aspects in the Preparation of Elite Athletes*. Zugriff im Juli 2007 unter <http://www.arielnet.com/topics2/articles/Scientific%20Aspects.htm>
- Aura, O. & Viitasalo, J.T. (1989). Biomechanical Characteristics of Jumping. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5 (1), 89-98.
- Ballreich, R. (1986). *Biomechanik der Sportarten*. Stuttgart: Enke.
- Ballreich, R. & Kuhlow, A. (1986). *Biomechanik der Leichtathletik*. Stuttgart: Enke.
- Bauersfeld, K.-H. & Schröter, G. (1998). *Grundlagen der Leichtathletik. Das Standardwerk für Ausbildung und Praxis* (5. Aufl.). Berlin: Sportverlag.
- Berg, W.P. & Greer, N.L. (1995). A Kinematic Profile of the Approach Run of Novice Long Jumpers. *Journal of Applied Biomechanics*, 11 (2), 142 – 162.
- Birklbauer, J. (2006). *Modelle der Motorik. Eine vergleichende Analyse moderner Kontroll-, Steuerungs- und Lernkonzepte*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Bosco, C., Ito, A., Komi, P.V., Luhtanen, P., Rahkila, P., Rusko, H. (1982). Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercises. *Acta Physiologica Scandinavica*, 114 (4), 543-550.
- Bosco, C., Luhtanen, P. & Komi, P.V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50 (2), 273-282.
- Böttcher, J. (2011). Untersuchungsverfahren der Leistungsdiagnostik an den Olympiastützpunkten. Bild-Messwert-Kopplung – die Verbindung kinematischer und dynamischer Parameter. *Leistungssport*, 41 (3), 60-62.
- Braybrook, S. (2008). *A Kinematic Analysis of the Lower Extremity's in the Approach and the Take-Off Phases of the Male Long Jump*. Biomechanics and Performance Analysis in Sport and Exercise. Zugriff im Oktober 2010 unter <http://freeflowmotion.yolasite.com/articals.php>
- Bridgett, L.A. & Linthorne, N.P. (2006). Changes in long jump take-off technique with increasing run-up speed. *Journal of Sports Sciences*, 24 (8), 889-897.
- Brüggemann, P., Nixdorf, E. & Ernst, H. (1982). Biomechanische Untersuchungen beim Weitsprung. *Leichtathletik*, 33 (Die Lehre der Leichtathletik 40/49), 1635-1642.
- Coh, M., Kugovnik, O. & Dolenc, A. (1997). Kinematisch-dynamische Analyse der Absprungaktion beim Weitsprung. *Leistungssport*, 27 (2), 47-49.
- Czington, H. (1995). Komplexer Planungsvorschlag für Sprungdisziplinen. *Leichtathletiktraining*, 9/10, 42-45.
- Czington, H. & Joch, W. (1995). *Sprung* (3. Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer.

-
- Dickwach, H. (1991). *Leichtathletik, Sprung. Analysen und Empfehlungen für die Disziplinen Hochsprung, Stabhochsprung, Weitsprung und Dreisprung* (1. Aufl.). Berlin: Sportverlag.
- Eckstein, P.P. (2008). *Angewandte Statistik mit SPSS. Praktische Einführung für Wirtschaftswissenschaftler* (6. Aufl.). Wiesbaden: Gabler.
- Fukasiro, S. & Wakayama, A. (1992). The men's Long Jump. *New Studies in Athletics*, 7 (1), 53-56.
- Gehrke, K. (1997). Horizontale Sprünge sind als Trainingsmittel ein Schlüssel zum Erfolg. *Leichtathletiktraining*, 5/6, 52-62.
- Gollhofer, A., Schmidtbleicher, D. & Dietz, V. (1984). Regulation of muscle stiffness in human locomotion. *International Journal of Sports Medicine*, 5 (1), 19-22.
- Graham-Smith, P. & Lees, A. (1997). A Comparison of the Information Quality Between Cinematography and Videography for Long Jump Technique Analysis. *Biology of Sport*, 14 (3), 213-225.
- Graham-Smith, P. & Lees, A. (2005). A three-dimensional kinematic analysis of the long jump take-off. *Journal of Sports Sciences*, 23 (9), 891-903.
- Grosser, M. & Neumaier, A. (1982). *Techniktraining: Theorie und Praxis aller Sportarten*. München: BLV Buchverlag.
- Güllich, A. & Schmidtbleicher, D. (1999). Struktur der Kraftfähigkeiten und ihrer Trainingsmethoden. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 50 (7+8), 223-234.
- Günther, M., Sholukha, V.A., Kessler, D., Wank, V. & Blickhan, R. (2003). Dealing with Skin Motion and Wobbling Masses in Inverse Dynamics. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 3 (3+4), 309-335.
- Haberkorn, C. & Plaß, R. (1992). *Sprung, Wurf, Stoß* (1. Aufl.). Frankfurt am Main: Diesterweg.
- Hay, J.G. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques* (4. Aufl.). Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Hay, J.G. (1986). The Biomechanics of the Long Jump. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 14, 401-446.
- Hay, J.G. (1988). Approach Strategies in the Long Jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4 (2), 114-129.
- Hay, J.G. (1995). Aktuelle Erkenntnisse zur Biomechanik des Weitsprungs. *Leichtathletik*, 34 (Die Lehre der Leichtathletik 34/95) 129-135.
- Hay, J.G. (2008). *The Takeoff in the Long jump & Other Running Jumps*. Coaches Information Service - Field Athletics website, The University of Edinburgh, Faculty of Education, Dept of Physical Education, Sport & Leisure Studies Zugriff im Oktober 2010 unter <http://www.coachesinfo.com/index.php?view=article&id=361>
- Hay, J.G. & Koh, T.J. (1988). Evaluating the Approach in the Horizontal Jumps. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4 (4), 372-392.

-
- Hay, J.G. & Miller, J.A. (1985a). Techniques Used in the Transition From Approach to Takeoff in the Long Jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1 (2), 174-184.
- Hay, J.G. & Miller, J.A. (1985b). Techniques Used in the Triple Jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1 (3), 185-196
- Hay, J.G., Miller, J.A. & Canterna, R.W. (1986). The Techniques of Elite Male Long Jumpers. *Journal of Biomechanics*, 19 (10), 855-866.
- Hay, J.G. & Nohara, H. (1990). Techniques Used by Elite Long Jumpers in Preparation for Takeoff. *Journal of Biomechanics*, 23 (3), 229-239.
- Hess, S. (2010). Die acht Meter immer im Blick. *Leichtathletiktraining*, 2/3, 22-27.
- Hohmann, A., Lames, M. & Letzelter, M. (2007). *Einführung in die Trainingswissenschaft* (4. Aufl.). Wiebelsheim: Limpert.
- Hotz, A. & Weineck, J. (1983). *Optimales Bewegungslernen. Anatomisch-physiologische und bewegungspsychologische Grundlagenaspekte des Techniktrainings*. Erlangen: Perimed-Fachbuch-Verlags-Ges.
- Huber, A., Heger, H., Elster, H. & Wank, V. (2010). Strategien zur Absprunggestaltung im Weitsprung. In K. Mattes & B. Wollesen (Hrsg.), 8. *Gemeinsames Symposium der dvs-Sektion Biomechanik, Sportmotorik und Trainingswissenschaft* (Band 204, S. 64). Hamburg: Feldhaus Edition Czwalina.
- Huber, A., Heger, H. & Wank, V. (2011). Vergleichende Studie zur Absprunggestaltung im Weitsprung. In T. Siebert & R. Blickhan (Hrsg.), *Biomechanik - vom Muskelmodell bis zur angewandten Bewegungswissenschaft* (Band 219, S. 182-188). Jena: Feldhaus Edition Czwalina.
- Huber, A., Heger, H. & Wank, V. (2012). Biomechanische Leistungsdiagnostik von Kaderathleten im Weitsprung – ein Betreuungsprojekt am OSP Stuttgart über drei Jahre. In P. Wastl & W. Killing (Hrsg.), *Leichtathletik - Strukturen, Aufgaben und Qualifikationen*: Feldhaus Edition Czwalina.
- Jaitner, T. (2002). *Techniktraining mit passiven Bewegungshilfen*. Frankfurt (Main): Peter Lang Verlag.
- Jaitner, T. (2007). Time Continuous vs. Time Discrete Analysis of the Take Off Technique in Long Jump, *XXV ISBS Symposium 2007* (S. 466-469). Ouro Preto - Brazil.
- Jaitner, T., Mendoza, L. & Schöllhorn, W.I. (2001). Analysis of the long jump technique in the transition from approach to takeoff based on time-continuous kinematic data. *European Journal of Sport Science*, 1 (5), 1-12.
- Jonath, U. (1995). *Springen*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verlag.
- Kakihana, W. & Suzuki, S. (2001). The EMG activity and mechanics of the running jump as a function of takeoff angle. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11 (5), 365-372.

-
- Killing, W., Stahl, E. & Mattes, K. (2005). Pilotprojekt Horizontale Sprünge. *Leichtathletiktraining*, 7, 32-37.
- Klein, P. & Sommerfeld, P. (2004). *Biomechanik der menschlichen Gelenke*. München: Elsevier, Urban & Fischer.
- Knapp, U. (2008). Das Einmaleins des Weitsprungs. *Leichtathletiktraining*, 9/10, 28-34.
- Koh, T.J. & Hay, J.G. (1990). Landing Leg Motion and Performance in the Horizontal Jumps. The Long Jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6 (4), 343-360.
- Laffaye, G., Bardy, B.G. & Durey, A. (2005). Leg stiffness and expertise in men jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37 (4), 536-543.
- Larkins, C. (1989). *The Takeoff Drill for the Long Jump*. Track Coach 107, public service by Track & Field News. Zugriff am Oktober 2010 unter http://www.trackandfieldnews.com/technique/107-Clifford_Larkins.pdf
- Lee, D.N., Lishman, J.R. & Thomson, J.A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8 (3), 448-459.
- Lees, A., Graham-Smith, P. & Fowler, N.E. (1994). A Biomechanical Analysis of the Last Stride, Touchdown, and Takeoff Characteristics of the Men's Long Jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 10 (1), 61-78.
- Linthorne, N.P. (2008). *Optimum angles of projection in the throws and jumps*. Coaches Information Service - Field Athletics website, The University of Edinburgh, Faculty of Education, Dept of Physical Education, Sport & Leisure Studies Zugriff im Oktober 2010 unter <http://www.coachesinfo.com/index.php?view=article&id=358>
- Linthorne, N.P. (2006). Throwing and jumping for maximum horizontal range. *Submitted to American Journal of Physics*.
- Linthorne, N.P., Guzman, M.S. & Bridgett, L.A. (2005). Optimum take-off angle in the long jump. *Journal of Sports Sciences*, 23 (7), 703-712.
- Luhtanen, P. & Komi, P.V. (1979). Mechanical power and segmental contribution to force impulses in long jump take-off. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 41 (4), 267-274.
- Marino, G.W. & Young, W. (1990). Biomechanics of Takeoff Techniques in modified Jumping Activities. In E. Kreighbaum & A. McNeill (Hrsg.), *ISBS, 6 International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 187-195). Bozeman, Montana, USA.
- Martin, D. (1999). Prozessbegleitende Trainings- und Wettkampfforschung mit wissenschaftsorientierter Betreuung im Spitzensport. In A. Hohmann, E. Wichmann & K. Carl (Hrsg.), *Feldforschung in der Trainingswissenschaft* (S. 36-48). Köln: Sport und Buch Strauss.
- Mehrez, A. & Ladany, S.P. (1987). A Utility Model for Evaluation of Optimal Behavior of a Long Jump Competitor. *Simulation & Gaming*, 18 (3), 344-359.

-
- Mendoza, L. (1998). Individuelle Optimierung der Landeweite beim Weitsprung mit Hilfe der Computersimulation. *Leistungssport*, 41 (4), 35-40.
- Mendoza, L. & Nixdorf, E. (2011). Biomechanische Wettkampfdiagnostik in den leichtathletischen Horizontalsprüngen. Untersuchungsverfahren der Leistungsdiagnostik an den Olympiastützpunkten. *Leistungssport*, 41 (4), 59-62.
- Miladinov, O. (2006). New aspects in perfecting the long jump technique. *New Studies in Athletics*, 21 (4), 7-25.
- Milan, C., Kugovnik, O. & Dolenc, A. (1997). Kinematisch-dynamische Analyse der Absprungaktion beim Weitsprung. *Leistungssport*, 2, 47-49.
- Miller, J.A. & Hay, J.G. (1986). Kinematics of a World Record and Other World-Class Performances in the Triple Jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2 (4), 272-288.
- Müller, H. & Brüggemann, G.-P. (1998a). Leichtathletik-WM 1997 Athen: Biomechanische Untersuchungen. Weitsprung. *Leichtathletik*, 37 (Die Lehre der Leichtathletik 24/98), 45-48.
- Müller, H. & Brüggemann, G.-P. (1998b). Leichtathletik-WM 1997 Athen: Biomechanische Untersuchungen. Weitsprung. *Leichtathletik*, 37 (Die Lehre der Leichtathletik 25/98), 49-50.
- Muraki, Y., Ae, M., Yokozawa, T. & Koyama, H. (2005). Mechanical properties of the take-off leg as a support mechanism in the long jump. *Sports Biomechanics*, 4 (1), 1-15.
- Murrie, D.W. (1996). Effects of Winds on World Class Long Jump Performance, 14 *International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 301-304). Funchal - Madeira - Portugal.
- Neumaier, A. & Ritzdorf, W. (1983). Zum Problem der individuellen sportlichen Technik. *Leistungssport*, 13 (5), 27-32.
- Nigg, B., Neukomm, P. & Waser, J. (1973). Messungen im Weitsprung an Weltklassespringern. *Leistungssport*, 3 (4), 265-271.
- Nitsch, J.R. (Hrsg.). (1997). *Techniktraining. Beiträge zu einem interdisziplinären Ansatz* (1. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Nixdorf, E. & Brüggemann, P. (1983). Zur Absprungvorbereitung beim Weitsprung - Eine biomechanische Untersuchung zum Problem der Körperschwerpunktsenkung. *Leichtathletik*, 33 (Die Lehre der Leichtathletik 37/46), 1539-1541.
- Nolan, L. & Lees, A. (2000). Touch-down and take-off characteristics of the long jump performance of world level above- and below-knee amputee athletes. *Ergonomics*, 43 (10), 1637-1650.
- Perl, J. (2002). *Modellbildung in der Sportwissenschaft*. Schorndorf: Hofmann.
- Petermann, F. (1989). *Einzelfallanalyse* (2. Aufl.). München: Oldenbourg.

-
- Ramey, M.R. (1982). Biomechanics of the Long Jump and Triple Jump. In J. Terauds (Hrsg.), *ISBS, 1 International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 251-265). San Diego, USA.
- Ramlow, J. & Romanautzky, R. (1997). Das Absenken des Körperschwerpunkts vor dem Absprung beim Weitsprung - nicht nur eine Frage der Schrittlängengestaltung. *Leistungssport*, 6, 44-47.
- Reinsch, C.H. (1967). Smoothing by Spline Functions. *Numerische Mathematik*, 10 (3), 177-183.
- Rídká-Drdácká, E. (1986). A Mechanical Model of the Long Jump and Its Application to a Technique of Preparatory and Takeoff Phases. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2 (4), 289-300.
- Rieder, H. & Lehnertz, K. (1991). *Bewegungslernen und Techniktraining*. Schorndorf: Hofmann.
- Roth, K. & Willimczik, K. (1999). *Bewegungswissenschaft*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verlag.
- Röthig, P. (1992). *Sportwissenschaftliches Lexikon* (6. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Sachs, L. (2004). *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden* (11. Aufl.). Berlin: Springer.
- Schlicht, W. (1988). *Einzelfallanalysen im Hochleistungssport. Zum Verlauf und zur Wirkung selbstbezogener Aufmerksamkeit im 400-Meter-Hürdenlauf*. Hofmann, Schorndorf.
- Schlottke, K. (2002). Geräteinsatz im Sprungbereich. *Leichtathletiktraining*, 1/2, 48-51.
- Schmalz, T. (1993). *Biomechanische Modellierung menschlicher Bewegung*. Schorndorf: Hofmann.
- Schmidt, O. (2001). Sprungkrafttests. *Leichtathletiktraining*, 1, 30-31.
- Schmidt, R.F. & Lang, F. (2007). *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie* (30. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag Heidelberg.
- Schmitt, S. & Günther, M. (2011). Human leg impact: energy dissipation of wobbling masses. *Archive of Applied Mechanics*, 81 (7), 887-897.
- Schnabel, G. (2005). *Trainingswissenschaft. Leistung - Training - Wettkampf* (3. Aufl.). Berlin: Sportverlag.
- Schütze, H. (2001). Horizontale Sprünge - ein vielseitiges Trainingsmittel. *Leichtathletiktraining*, 8, 34-39.
- Scott, M.A., Li, F.X. & Davids, K. (1997). Expertise and the regulation of gait in the approach phase of the long jump. *Journal of Sports Sciences*, 15 (6), 597-605.
- Seyfarth, A., Blickhan, R. & Van Leeuwen, J.L. (2000). Optimum take-off techniques and muscle design for long jump. *Journal of Experimental Biology*, 203 (4), 741-750.

-
- Seyfarth, A., Friedrichs, A., Wank, V. & Blickhan, R. (1999). Dynamics of the long jump. *Journal of Biomechanics*, 32 (12), 1259-1267.
- Stefanyshyn, D.J. & Nigg, B.M. (1998). Contribution of the lower extremity joints to mechanical energy in running vertical jumps and running long jumps. *Journal of Sciences*, 16 (2), 177-186.
- Thiess, G., Schnabel, G. & Baumann, R. (1980). *Training von A bis Z*. Berlin: Sportverlag.
- Tidow, G. (1989). Model technique analysis sheet for the horizontal jumps - The Long Jump. *New Studies in Athletics*, 3, 47-62.
- Tipler, P.A. & Mosca, G. (2009). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* (6. Aufl.). Heidelberg: Spektrum.
- Tittel, K. (1994). *Beschreibende und funktionelle Anatomie des Menschen* (12. Aufl.). Jena: Fischer.
- Wank, V. (2007). *Biomechanik der Sportarten*. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript. Eberhard Karls Universität Tübingen.
- Weidner, H. & Dickwach, H. (1990). Characteristics of the long jump technique. *Modern athlete and coach*, 28 (2), 3-6.
- Weineck, J. (2007). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (15. Aufl.). Balingen: Spitta.
- Weineck, J. (2008). *Sportanatomie* (18. Aufl.). Balingen: Spitta-Verlag.
- Winter, D.A. (2004). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. New York: Wiley.
- Wirth, K., Sander, A., Keiner, M. & Schmidtbleicher, D. (2011). Leistungsfähigkeit im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus sportlich aktiver und inaktiver Kinder und Jugendlicher. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 62 (11), 345-350.
- Witters, J., Bohets, W. & Coppenolle, H.V. (1992). A model of the elastic take-off energy in the long jump. *Journal of Sciences*, 10 (6), 533-540.
- Zatsiorsky, V.M. (2002). *Kinetics of Human Motion*. Champaign: Human Kinetics.
- Zatsiorsky, V.M. & Prilutsky, B.I. (2012). *Biomechanics of Skeletal Muscles*. Champaign: Human Kinetics.

Abkürzungen

Allgemeine Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
M	Mittelwert
m	Masse [kg]
KSP	Körperschwerpunkt
mA	mittlerer Anlauf
WkA	Wettkampfanlauf
W	effektive Sprungweite [m]
W_{theor}	theoretische Sprungweite (nach Formel berechnet) [m]
LS1	Lichtschranke 1 (bei -11m bis -6m)
LS2	Lichtschranke 2 (bei -6m bis -1m)
Q_{Absprung}	Quotient zur Effizienzbestimmung der Umlenkbewegung (Formel26) []

Abkürzungen dynamischer Parameter

Abkürzung	Bedeutung
$F_{x,\text{Min}}$	horizontales Kraftminimum [N]
$F_{x,\text{Max}2}$	horizontales Kraftmaximum [N]
S_x	horizontaler Kraftstoß [Ns]
$-S_x$	horizontaler Bremskraftstoß [Ns]
$+S_x$	horizontaler Beschleunigungskraftstoß [Ns]
$F_{z,\text{Max}1}$	erstes vertikales Kraftmaximum [N]
$F_{z,\text{Max}2}$	zweites vertikales Kraftmaximum [N]
$F_{z,\text{Min}}$	vertikales Kraftmaximum [N]
S_z	vertikaler Kraftstoß [Ns]
$-S_z$	vertikaler Bremskraftstoß [Ns]
$+S_z$	vertikaler Beschleunigungskraftstoß [Ns]

Abkürzungen kinematischer Parameter

Abkürzung	Bedeutung
w_0	Stemmpositionsweite [m]
h_0	Landepositionshöhe [m]
x_0	Abflugpositionsweite [m]
z_0	Abflughöhe [m]
x_L	Landeverlust
v_{LS1}	Geschwindigkeit zwischen Lichtschrankenintervall 1, zwischen -11m und -6m, [m/s]
v_{LS2}	Geschwindigkeit zwischen Lichtschrankeintervall 2, zwischen -6m und -1m, [m/s]
$t_{Stütz}$	Stützzeit im Absprung [s]
$v_{z,KSP}$	vertikale Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts [m/s]
$a_{x,KSP}$	horizontale Beschleunigung des Körperschwerpunkts [m/s]
$v_{ges,Einstieg}$	Gesamteinstiegsgeschwindigkeit [m/s]
$v_{ges,Abflug}$	Gesamtabfluggeschwindigkeit [m/s]
$v_{x,Einstieg}$	horizontale Anfangsgeschwindigkeit (beim Brettkontakt) [m/s]
$v_{x,Abflug}$	horizontale Abfluggeschwindigkeit (beim Lösen vom Brett) [m/s]
$\Delta v_{x,Absprung}$	horizontale Geschwindigkeitsänderung über den gesamten Absprung [m/s]
$\Delta v_{x,Bremsen}$	horizontale Geschwindigkeitsänderung des Bremsanteils [m/s]
$\Delta v_{x,Beschl}$	horizontale Geschwindigkeitsänderung des Beschleunigungsanteils [m/s]
$v_{z,Einstieg}$	vertikale Anfangsgeschwindigkeit (beim Brettkontakts [m/s]
$v_{z,Abflug}$	vertikale Abfluggeschwindigkeit (beim Lösen vom Brett) [m/s]
$\Delta v_{z,Absprung}$	vertikale Geschwindigkeitsänderung über den gesamten Absprung [m/s]
$\Delta v_{z,Bremsen}$	vertikale Geschwindigkeitsänderung des Bremsanteils [m/s]
$\Delta v_{z,Beschl}$	vertikale Geschwindigkeitsänderung des Beschleunigungsanteils [m/s]
Δv_{ges}	Gesamtgeschwindigkeitsänderung [m/s]
$\alpha_{Stemmen}$	Stemmwinkel [°]
$\alpha_{Knie,Aufstz}$	Kniewinkel beim Fußaufsatz [°]
$\alpha_{Knie,min}$	Kleinster Kniewinkel in der Absprunghase [°]
$\Delta\alpha_{Knie,Beugen}$	Kniewinkeländerung in der Beugephase des Absprungs [°]
$\Delta\alpha_{Knie,Abdruck}$	Kniewinkeländerung in der Abdruckphase des Absprungs [°]
$\alpha_{Hüfte,Aufstz}$	Hüftwinkel beim Fußaufsatz [°]
$\alpha_{Hüfte,min}$	Kleinster Hüftwinkel in der Absprunghase [°]
$\Delta\alpha_{Hüfte}$	Kniewinkeländerung in der Absprunghase [°]
$\alpha_{Stütz}$	Stützwinkel [°]
$\alpha_{Kraftangriff}$	Kraftangriffswinkel [°]