

Biomechanik Assignment 1

Lisa Umlauff

Verena Hammes

Simon Kohne

Carsten Andruschek

Julia Bakker

21. Januar 2022

Theorie

Grundlagen aus der Literatur

1. Berechnungsvorschrift für die ‘offizielle Sprungweite’ und die Flugweite des Körperschwerpunkts

Die offizielle Sprungweite ($d_{official}$) ist die Distanz von der Absprunglinie bis zum nächstgelegenen Punkt, an dem der Athlet mit einem Körperteil die Landezone berührt. Sie wird durch die Summe aus der Weite des Absprungs ($d_{take-off}$), der Flugweite (d_{flight}) und der Landedistanz ($d_{landing}$) berechnet. (Linthorne et al., 2005b)

$$d_{official} = d_{take-off} + d_{flight} + d_{landing}$$

Die Flugdistanz wird als die horizontale Weite beschrieben, die der Körperschwerpunkt vom Moment des Absprungs bis zu dem Moment der Landung zurücklegt. Mit 90 % ist die Flugweite ein großer Anteil der offiziellen Sprungweite. Berechnet wird die Flugweite aus der Absprunggeschwindigkeit v , dem Absprungwinkel θ , der Beschleunigung g , die durch die Erdanziehungskraft bedingt ist, und der relativen Absprunghöhe h . In dieser Berechnung wird der Athlet als ein Körper in freiem Flug angesehen. (Linthorne et al., 2005b)

$$d_{flight} = \frac{v^2 \sin 2\theta}{2g} \left[1 + \left(1 + \frac{2gh}{v^2 \sin^2 \theta} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Die relative Absprunghöhe setzt sich aus der Summe von $h_{take-off}$ und $h_{landing}$ zusammen.

Wenn die relative Absprunghöhe gleich 0 ist, verändert sich die Berechnung der Flugdistanz wie folgend (Linthorne et al., 2005b):

$$d_{flight} = \frac{(v^2 \sin 2\theta)}{g}$$

2. Skizzieren Sie ein deterministisches Modell des Weitsprungs und erklären Sie die grundlegenden Prinzipien zur Erstellung eines solchen Modells

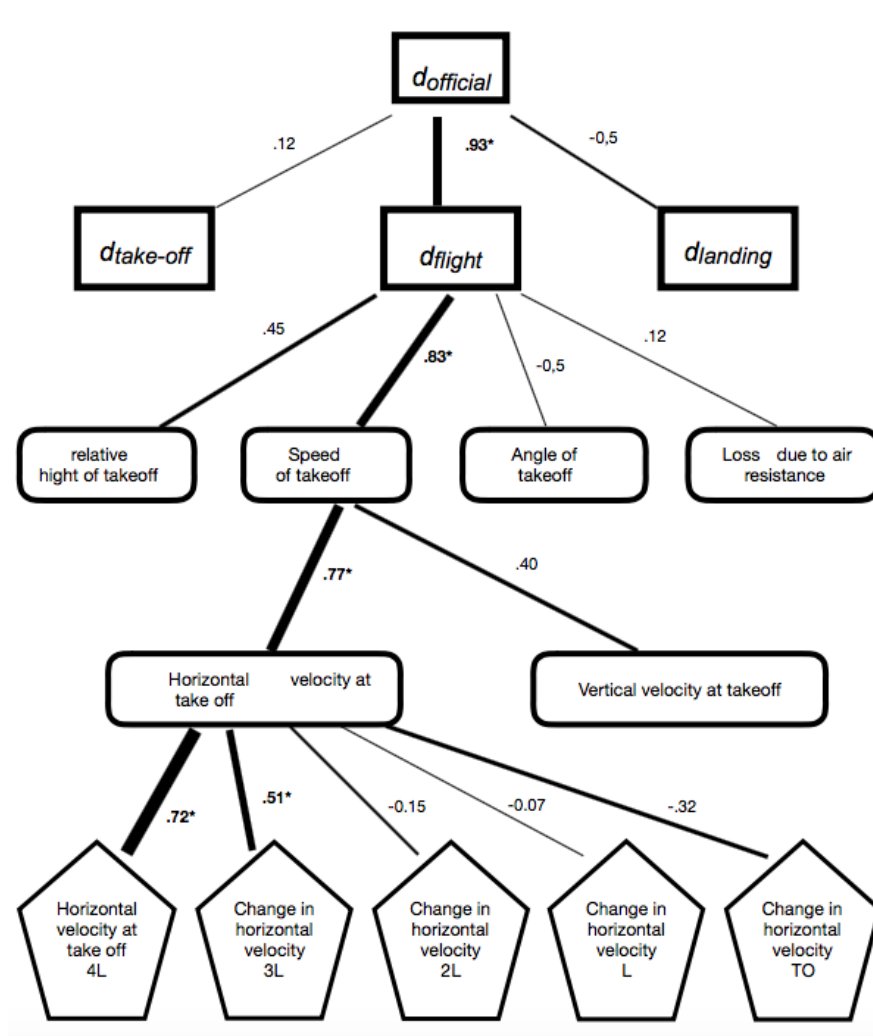


Abbildung 1: (Hay et al., 1986)

Ein deterministisches Modell wird verwendet um Korrelationen und Sinneszusammenhänge nach ihren Bedeutsamkeiten darzustellen. Komplexe Ergebnisse von Untersuchungen lassen sich so hierarchisch darlegen. Zudem lassen deterministische Modelle graphisch schnell ein Überblick über signifikante oder schwache Korrelationen zu. Die Stärke oder Dicke von Verbindungen sowie Korrelationskoeffizienten charakterisieren des Weiteren Zusammenhänge.

Ausgehend von einer im Zentrum stehenden Kenngröße (z.B. Sprungweite), werden auf mehreren Ebenen Teilaspekte der darüber geordneten Aspekte dargestellt. im Allgemeinen sinkt mit jeder Ebene die Bedeutung der Aspekte bzw. werden die Aspekte weiter in Einzelaspekte zerlegt.

3. Welche drei Parameter Ihres deterministischen Modells haben anhand von empirischen Daten den größten Einfluss auf die Flugweite?

1. d_{flight} (Flugweg) : Korrelationskoeffizient : 0,93
2. Speed of take off (Geschwindigkeit beim Absprung) : Korrelationskoeffizient : 0,83
3. Horizontal velocity at take off (horizontale Geschwindigkeit beim Absprung) : Korrelationskoeffizient : 0,77

Diese drei Parameter haben anhand ihrer Korrelationskoeffizienten in Zusammenhang auf die Sprungweite (d_{official}) den Größten positiven Einfluss auf diese. (Hay et al., 1986)

4. Welchen Einfluss hat die Anlaufgeschwindigkeit auf die folgenden Parameter:

* Vertikale, horizontale und resultierende Absprunggeschwindigkeit

Bridgett and Linthorne (2006b) finden in ihren Untersuchungen der Zusammenhänge von “run-up speed” und “horizontal and vertical take-off speed” heraus, dass je grösser die horizontale Anlaufgeschwindigkeit des Athleten, desto höher auch die resultierende Absprunggeschwindigkeit, ist. Diese errechnet sich aus der Vektorsumme der horizontalen und vertikalen Absprunggeschwindigkeit. Über die untersuchten, variierenden Anlaufgeschwindigkeiten, blieb die maximal vertikale Absprunggeschwindigkeit bei circa $3,4\text{m/s}^2$ konstant. Steigt die Anlaufgeschwindigkeit, so nimmt ebenso die horizontale Absprunggeschwindigkeit zu.

* Absprungwinkel

Der Absprungwinkel wird durch das Verhältnis der vertikalen Absprunggeschwindigkeit zur horizontalen Absprunggeschwindigkeit bestimmt. Erhöht der Athlet seine Anlaufgeschwindigkeit, so nimmt die horizontale Geschwindigkeit beim Absprung zu, und der Absprungwinkel verkleinert sich (Bridgett and Linthorne, 2006b).

* Beinanstellwinkel ('Angle of Attack' bzw. 'Leg angle at touch down')

Eine höhere Anlaufgeschwindigkeit impliziert grössere Schrittlängen des Athleten. Damit geht ein weites Vorausstellen des Absprungsbeins vor den Körperschwerpunkt zum Zeitpunkt des Absprungs einher, um eine längere Bodenkontaktzeit zu erzeugen und eine somit grössere vertikale Geschwindigkeit zu transformieren. Der Beinanstellwinkel reduziert sich demnach, je höher die Anlaufgeschwindigkeit ist (Bridgett and Linthorne, 2006b).

* Minimaler Kniewinkel

Mit zunehmender Anlaufgeschwindigkeit vergrössert sich der minimale Kniewinkel zum Zeitpunkt des Absprungs. Je geringer der Kniewinkel, desto höher ist die vertikale Absprunggeschwindigkeit.

* Bodenkontaktzeit

Je höher die Anlaufgeschwindigkeit, desto geringer ist die Bodenkontaktzeit. Je kürzer die Bodenkontaktzeit wiederum, desto geringer ist der vertikale Impuls.

5. Grosse des optimalen 'Abflugwinkels'

Linthorne et al. (2005) bewiesen, dass der optimale Abflugwinkel eines sich gleichmässig bewegendem Flugprojektils 45° ist. In diesem Winkel sind die horizontale und die vertikale Geschwindigkeit exakt gleich. Der optimale Absprungwinkel wird aus der Flugdistanz eines Körpers in freiem Flug mit dem Zusammenhang der Absprunggeschwindigkeit, der Absprunghöhe und dem Absprungwinkel berechnet. Dieser Winkel ist jedoch abhängig vom Athleten und kann sich durch die Absprunggeschwindigkeit, die relative Absprunghöhe oder die Absprunganstanz verschlechtern (Linthorne et al., 2005a). Springt der Athlet somit zum Beispiel mit einer höheren horizontalen Geschwindigkeit ab, als die maximal erreichbare vertikale Absprunggeschwindigkeit ($>4\text{m/s}^2$), so wird der zuvor genommene “optimale Absprungwinkel” kleiner (Brid-

[gett and Linthorne, 2006a](#)). Nach Linthorne et al. (2005) ist der optimale Abflugwinkel somit knapp über 20deg.

Grundlagen zur Datenanalyse

1. “Central difference” Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit aus den ermittelten Koordinaten:

In der Biomechanik gibt es drei verschiedene Kategorien um Ableitungen auszurechnen:

1. Analytische Verfahren
2. Graphische Verfahren
3. Numerische Verfahren

Die meist benutzte Methode sind die numerischen Verfahren. Um Geschwindigkeit (v) und Beschleunigung (a) anhand von bestimmten Zeitpunkten (i) und Positionen (s) über ein Zeitintervall (Δt) auszurechnen, wird die finite Differenz Methode, bzw. central difference method benutzt. Um a oder v zu einem bestimmten Zeitpunkt auszurechnen, werden Daten von den Zeitintervallen davor ($i-1$) und danach ($i+1$) benötigt ([Whittlesey, 2014](#)).

$$v_i = \frac{s_{i+1} - s_{i-1}}{2 (\Delta t)}$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 (\Delta t)}$$

Das Problem der Central Difference Methode zeigt sich bei den fehlenden Punkten ($i-1$) am Anfang und ($i+1$) am Ende der Aufzeichnung. Um dies zu lösen, gibt es die forward and backward difference equations:

$$v_1 = \frac{s_2 - s_1}{\Delta t} \text{ und } v_n = \frac{s_n - s_{n-1}}{\Delta t}$$

$$a_1 = \frac{s_1 - 2s_2 + s_3}{\Delta t^2} \text{ und } a_n = \frac{s_n - 2s_{n-1} + s_{n-2}}{\Delta t^2}$$

Noch besser wäre, Daten vor und nach der zu analysierenden Bewegung zu sammeln. ([Whittlesey, 2014](#))

2. Vorgehensweise zur Bestimmung der Position und Geschwindigkeit des KSP unter Verwendung der Segmentparameter von Dempster:

Dempster hat Daten von anatomischen Präparaten und Leichen gesammelt und Masse, Länge und Volumen der einzelnen Segmentparameter dokumentiert. Zudem hat er für jedes Segment den Schwerpunkt, sowie den Trägheitsmoment bestimmt. Diese Daten hat er in mehreren Tabellen zusammengefasst und 1955 veröffentlicht.

Um den Segmentschwerpunkt zu bestimmen, werden zuerst die x_{cg} und y_{cg} Koordinaten berechnet:

$$x_{cg} = x_{proximal} + R_{proximal} (x_{distal} - x_{proximal})$$

$$y_{cg} = y_{proximal} + R_{proximal} (y_{distal} - y_{proximal})$$

Der Wert R wird einer Tabelle von Dempster entnommen und $y_{proximal}$, $x_{proximal}$, y_{distal} und x_{distal} repräsentieren die Koordinaten der proximalen und distalen Segmentenden.

Um den Körperschwerpunkt eines Körperglieds oder mehreren Segmenten zu berechnen, wird anschließend folgende Formel benötigt:

$$x_{limb} = \frac{\sum_{s=1}^L P_s x_{cg_s}}{\sum_{s=1}^L P_s}$$

$$y_{limb} = \frac{\sum_{s=1}^L P_s y_{cg_s}}{\sum_{s=1}^L P_s}$$

Abbildung 2: (Whittlesey, 2014)

x_{limb} und y_{limb} repräsentieren die Koordinaten des KSPs des Körperglieds, L gibt die Anzahl der Segmente an, x_{cg} und y_{cg} stehen für den KSP jedes Segments, das in dem Glied enthalten ist und P_s gibt den Wert der Segmentmassen an, welchen man aus der Tabelle entnehmen kann.

Um den KSP eines ganzen Körpers zu bestimmen, gilt folgende Formel:

$$x_{total} = \sum_{s=1}^L P_s x_{cg_s}$$

$$y_{total} = \sum_{s=1}^S P_s y_{cg_s}$$

Abbildung 3: (Whittlesey, 2014)

x_{total} und y_{total} repräsentieren die Koordinaten des KSP des gesamten Körpers, x_{cg} und y_{cg} stehen für die Koordinaten des KSPs der Segmente, s gibt die Anzahl der Körpersegmente an und P_s den Wert der Segmentmassen im Verhältnis zum gesamten Körpergewicht (aus Tabelle).

Die Geschwindigkeit (v) des KSPs kann anschliessend mit den x und y Koordinaten über die CDM berechnet werden.

Grundlagen zur Positionierung und Einstellung der Kamera

1. Beschreiben Sie zwei Methoden zur Kalibration eines Videobildes

Methode 1: Diese Methode eignet sich für 2D-Videoanalysen, welche nur eine Kamera verwenden. Die Kamera wird lotrecht, d.h. im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung, aufgebaut. Dabei wird eine Messlatte im

Bild platziert, deren Masse bekannt sind. Bei der Videoanalyse wird am Computer mithilfe entsprechender Software zunächst die Messlatte digitalisiert, d.h. deren reelle Grösse in Bildeinheiten umgerechnet. Auf diese Weise erhält man den Skalierungsfaktor (s), mit dessen Hilfe sämtliche Bewegungen in x- und y-Richtung umgerechnet werden können.

$$\text{Skalierungsfaktor: } s = \frac{\text{reelle Länge (m)}}{\text{abgebildete Länge (Bildeinheiten)}}$$

$$x = s \cdot u$$

$$y = s \cdot v$$

Dabei stehen u und v für die abgebildete Länge auf der x- bzw. y-Achse und werden durch Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor s in reelle Einheiten umgerechnet.

Methode 2: Im Bildbereich werden mehrere Kontrollpunkte angebracht, deren exakte Koordinaten bekannt sind. Auf diese Weise kann die abgebildete Länge in reelle Einheiten umgerechnet werden. Des Weiteren kann eine Verzerrung des Bildes korrigiert werden, falls die Kamera so aufgebaut wurde, dass die optische Achse nicht lotrecht zur Bewegungsrichtung steht (nur relevant für 2D-Analyse). Dabei wird unter Verwendung der Koordinaten der Kontrollpunkte eine Formel zur Berechnung der reellen Grösse abhängig von der digitalisierten Grösse erstellt. Dieses Verfahren nennt sich *Fractional linear transformation* (FLT) für 2D-Analyse, bzw. *Direct linear transformation* (DLT) für 3D-Analyse. Dabei ist zu beachten, dass für 2D-Analysen mindestens vier Punkte erforderlich sind, welche nicht in einer Linie liegen. 3D-Analysen hingegen erfordern mindestens sechs Punkte, welche sich nicht in derselben Ebene befinden (?).

2. Wie muss die Kamera aufgebaut und eingestellt werden, um ein optimales Bild für die Aufnahme des Absprungs (d.h. letzter Bodenkontakt) beim Weitsprung zu erhalten?

Um den Moment des Absprungs beim Weitsprung möglichst gut aufzeichnen zu können, sollte die Kamera lotrecht zur Bewegungsrichtung, d.h. mit optischer Achse im rechten Winkel zur Anlaufrichtung, aufgestellt werden. Im Falle einer 2D-Analyse sollte das Objekt sich möglichst nah an der Kamera befinden, um eine Grössenverzerrung durch Perspektive (Gegenstände im Hintergrund erscheinen kleiner als solche im Vordergrund) zu vermeiden. Des Weiteren sollte die Kamera mithilfe einer Vorrichtung stabil aufgestellt werden, um zu verhindern, dass die Bildqualität durch Wackeln beeinträchtigt wird. Da es sich um eine schnelle Bewegung handelt, steigt die Aufnahmequalität mit kürzerer Bildfrequenz. Daher ist eine ausreichende Belichtung der Szene entscheidend, um bei der anschliessenden Analyse die Kontrollpunkte und Bewegungen möglichst gut erkennen zu können. Die Frequenz der Aufnahme sollte ungefähr 10fach höher sein als die der aufzunehmenden Bewegung. Für die Videoanalyse eines Sprints sind daher ca. 100-200Hz notwendig ([Carl J. Payton](#)).

Praktischer Teil

1. Kalibration und Digitalisierung SkillSpector

2. Darstellung der kinematischen Beschreibungsgrossen (Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung) des Körperschwerpunkts in vertikaler Richtung

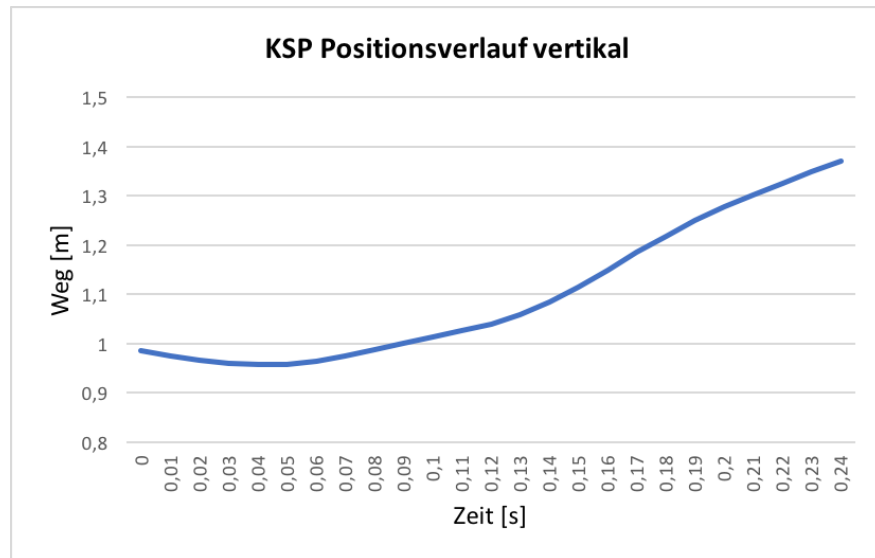


Abbildung 4: Graphische Darstellung der kinematischen Beschreibungsgrosse ‘Weg’ des Körperschwerpunkts des ausgewählten Weitspringers.

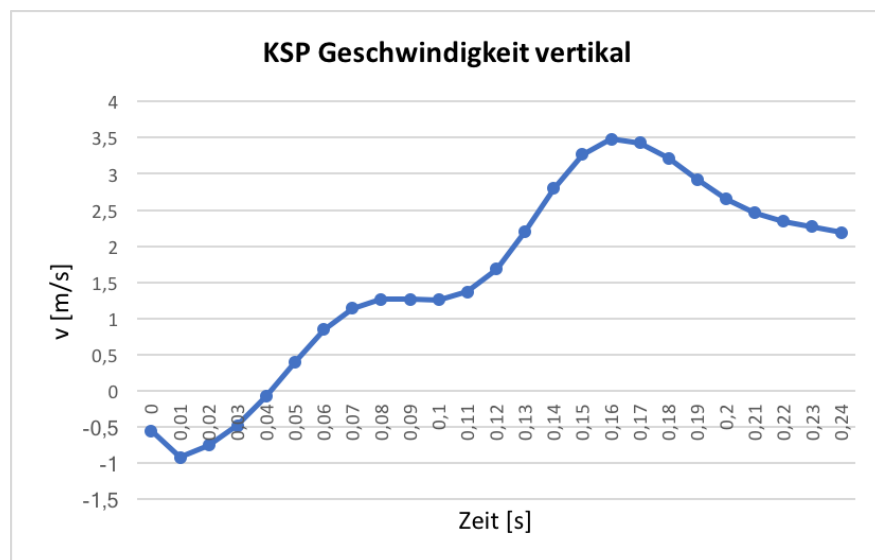


Abbildung 5: Graphische Darstellung der kinematischen Beschreibungsgrosse ‘Geschwindigkeit’ des Körperschwerpunkts des ausgewählten Weitspringers.

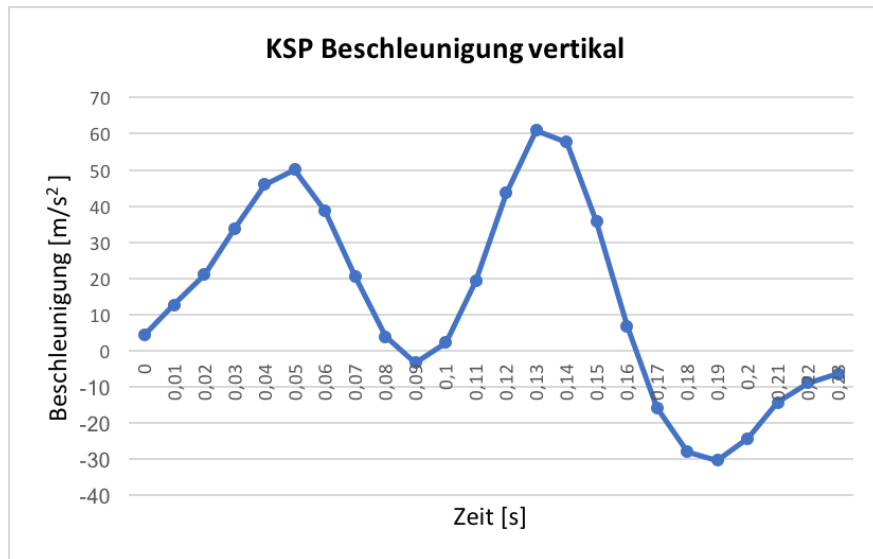


Abbildung 6: Graphische Darstellung der kinematischen Beschreibungsgrosse ‘Beschleunigung’ des Körperschwerpunkts des ausgewählten Weitspringers.

3. Darstellung der Winkel-Zeit Verläufe für das Sprunggelenk und das Kniegelenk

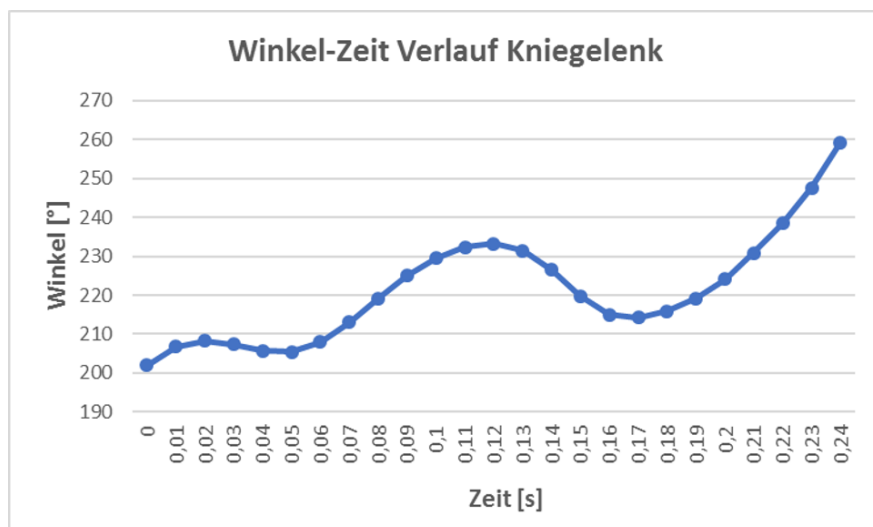


Abbildung 7: Graphische Darstellung des Winkel-Zeit Verlaufs für das Kniegelenk.

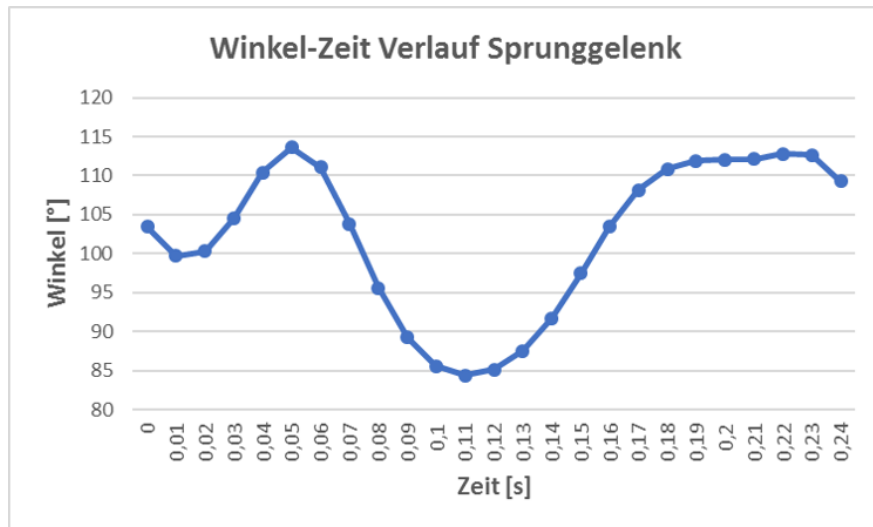


Abbildung 8: Graphische Darstellung des Winkel-Zeit Verlaufs für das Sprunggelenk.

4. Untersuchen Sie den Einfluss von verschiedenen Filtern auf den Winkel-Zeit-, Winkelgeschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Verlauf des Kniegelenkwinkels

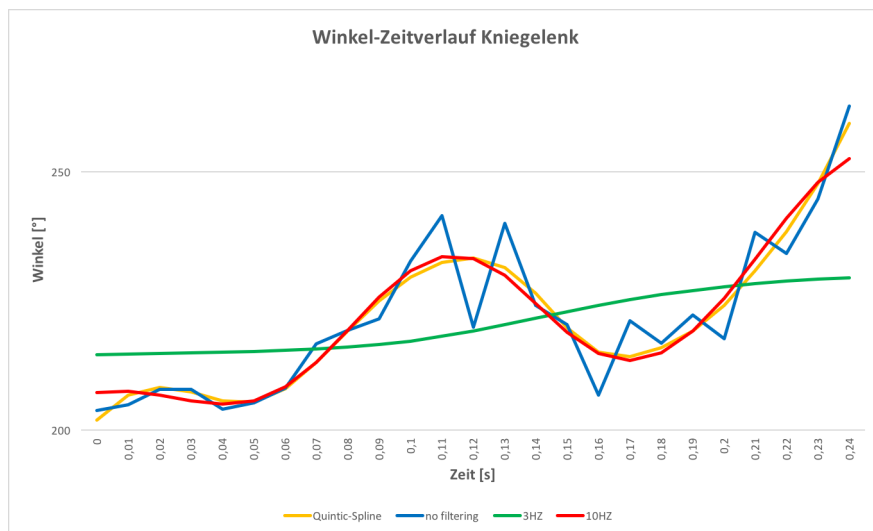


Abbildung 9: Einfluss verschiedener Filter auf den Winkel-Zeit-Verlauf des Kniegelenks

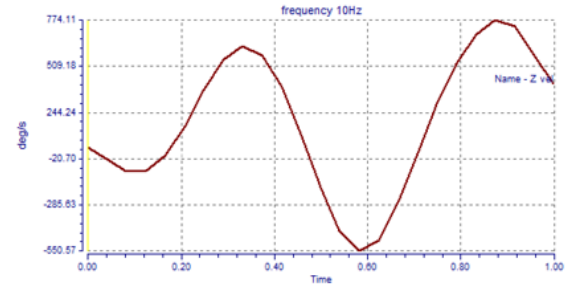
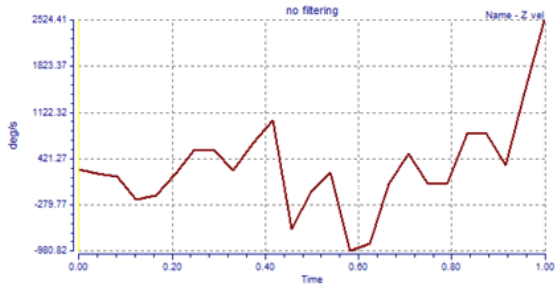
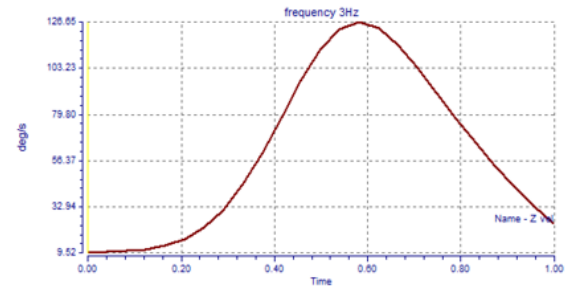
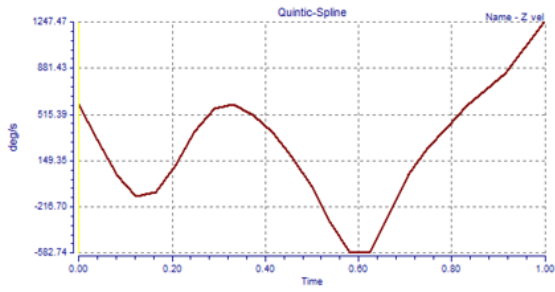


Abbildung 10: Einfluss verschiedener Filter auf den Winkelgeschwindigkeits-Zeit Verlauf des Kniegelenk

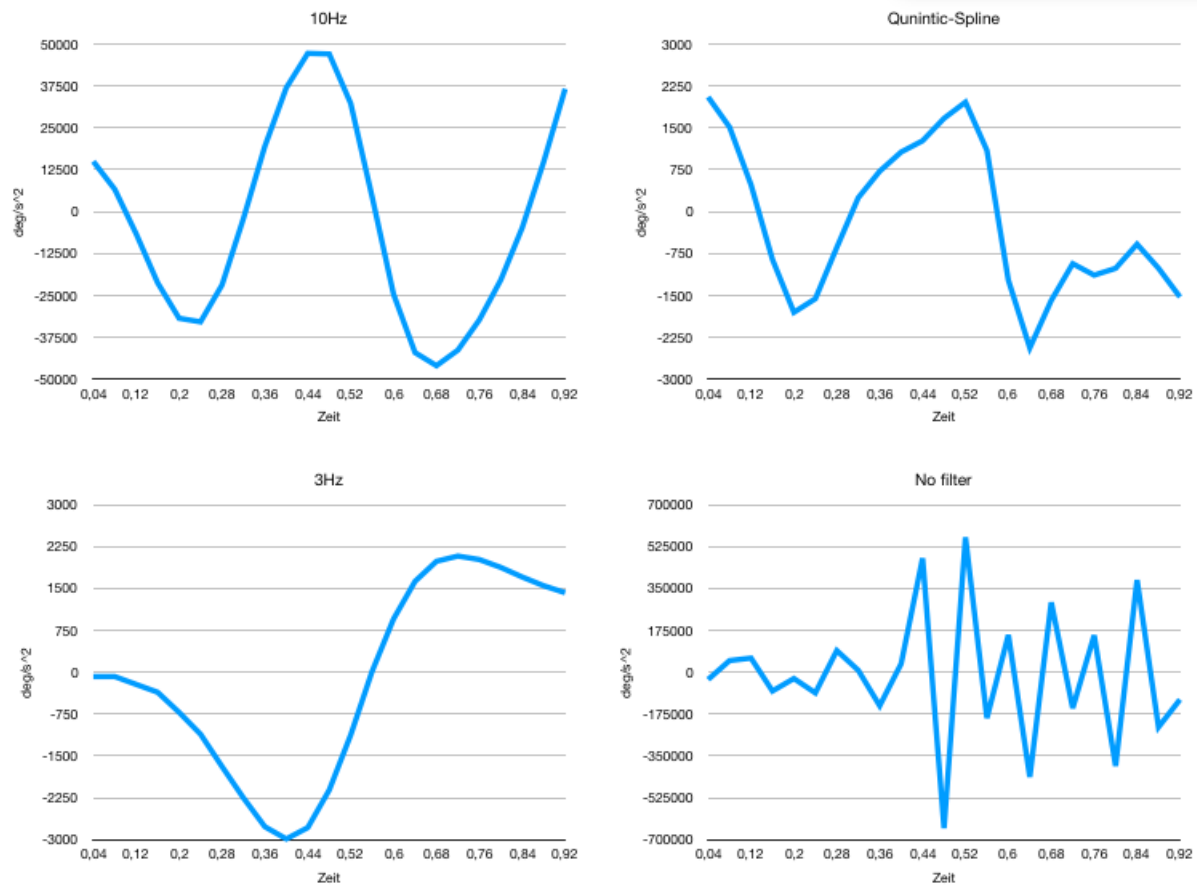


Abbildung 11: Einfluss verschiedener Filter auf Beschleunigungs-Zeit-Verlauf des Kniegelenkwinkels

5. Berechnung der Parameter, welche die Bewegung Weitsprung beschreiben.

Für sämtliche Geschwindigkeitsberechnungen wurde der Körperschwerpunkt (CG) verwendet.

a) Durchschnittliche Anlaufgeschwindigkeit von Beginn des Videos bis zum Touchdown (Frame 224-229), berechnet über den Mittelwert aller 6 Frames:

$$v_x = 8,945 \frac{m}{s}$$

b) Verlust der horizontalen Geschwindigkeit während des Absprungs, Touchdown (Frame 230) bis Toe-off (Frame 241):

$$v_x(241) - v_x(230) = 8,659 \frac{m}{s} - 8,703 \frac{m}{s} = -0,044 \frac{m}{s} \quad \text{Der Athlet verliert während des Absprungs an Geschwindigkeit.}$$

c) Vertikale Absprunggeschwindigkeit bei Toe-off (Frame 241):

$$v_y(241) = 3,477 \frac{m}{s}$$

Horizontale Absprunggeschwindigkeit bei Toe-off (Frame 241):

$$v_x(241) = 8,659 \frac{m}{s}$$

Resultierende Absprunggeschwindigkeit:

$$v_{res} = \sqrt{v_y^2 + v_x^2} = \sqrt{\left(3,477 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(8,659 \frac{m}{s}\right)^2} = 9,331 \frac{m}{s}$$

d) Absprungwinkel α

$$\tan \alpha = \frac{\text{vertikale Absprunggeschwindigkeit } v_y}{\text{horizontale Absprunggeschwindigkeit } v_x}$$

$$\tan \alpha = \frac{3,477 \frac{m}{s}}{8,659 \frac{m}{s}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{3,477 \frac{m}{s}}{8,659 \frac{m}{s}} \right) = 21,878 \text{deg}$$

e) Beinanstellwinkel ("Angle of Attack" bzw. "Leg angle")

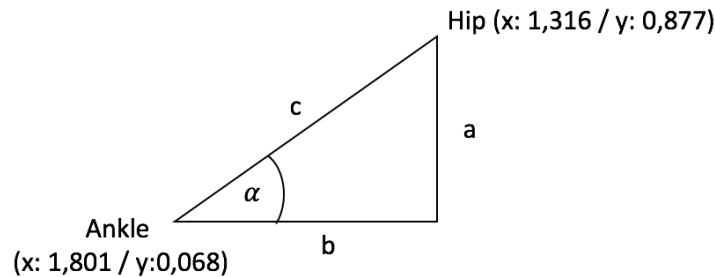


Abbildung 12: Skizze zur Veranschaulichung des Beinanstellwinkels α

$$\tan \alpha = \frac{a}{b} = \frac{y_{Hip} - y_{Ankle}}{x_{Hip} - x_{Ankle}} = \frac{0,877 - 0,068}{1,316 - 1,801} = \frac{0,809}{-0,485} = -1,668$$

$$\alpha = 59,057 \text{deg}$$

Der Beinanstellwinkel, also der Winkel zwischen Hüfte-Sprunggelenk und dem Boden, beträgt ungefähr 59deg.

f) Minimaler Kniewinkel (Innenwinkel), abgelesen bei Frame 229:

$$\beta = 154,59 \text{deg}$$

g) Beschleunigung des Körperschwerpunkts während der Flugphase (Frame 242-248) berechnet als Mittelwert aller Frames:

$$a = 29,689 \frac{m}{s^2}$$

h) Kontaktzeit, d.h. Zeit in der der Sprungfuss den Boden berührt:

$$\text{Frame } 229 - 241 = 12 \text{ Frames}$$

Aufnahme mit 100 Hz, entspricht 100 Bildern pro Sekunde

$$\frac{12}{100\text{s}^{-1}} = 0,12\text{s}$$

6. Vergleich unserer Daten mit denen von der Leichtathletik WM 2009

Messgrosse	Mittelwert WM	Unser Athlet	Differenz
Durchschnittliche Anlaufgeschwindigkeit [m/s]	10,40	8,95	1,45
Verlust bei Absprung [m/s]	1,62	0,04	1,57
Vertikale Absprunggeschwindigkeit [m/s]	3,53	3,48	0,06
Horizontale Absprunggeschwindigkeit [m/s]	8,78	8,66	0,12
Resultierende Absprunggeschwindigkeit [m/s]	9,48	9,33	0,15
Kontaktzeit [s]	0,12	0,12	0,00
Minimaler Kniewinkel [deg]	141	155	-14
Absprungwinkel [deg]	22,0	38,1	-16,1

Unser Athlet hat im Vergleich mit der Weltelite eine sehr ähnliche vertikale, sowie horizontale Absprunggeschwindigkeit. Zudem trifft er die gemittelte Kontaktzeit der Weltelite-Springer von 0,12 Sekunden auf den Punkt genau. Bei der Anlaufgeschwindigkeit ist allerdings eine grossere Differenz zu erkennen, hier muss unser Athlet noch schneller werden. Zudem ist sein Absprungwinkel deutlich grosser, diesen sollte er noch optimieren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Athlet im Vergleich zu Weltelite-Springern in genannten Parametern schon sehr ähnliche Werte abliefern. Seine Leistungsfähigkeit in dem Bereich Schnelligkeit und Bewegungsausführung (Absprungwinkel und Kniewinkel) ist weiterhin ausbaufähig.

Literatur

- Lisa A. Bridgett and Nicholas P. Linthorne. Changes in long jump take-off technique with increasing run-up speed. *Journal of Sports Sciences*, 24(8):889–897, aug 2006a. doi: 10.1080/02640410500298040. URL <https://doi.org/10.1080%2F02640410500298040>.
- Lisa A. Bridgett and Nicholas P. Linthorne. Changes in long jump take-off technique with increasing run-up speed. *Journal of Sports Sciences*, 24(8):889–897, aug 2006b. doi: 10.1080/02640410500298040. URL <https://doi.org/10.1080%2F02640410500298040>.
- Roger M. Bartlett Carl J. Payton. *Biomechanical evaluation of movement*.
- James G. Hay, John A. Miller, and Ron W. Canterna. The techniques of elite male long jumpers. *Journal of Biomechanics*, 19(10):855–866, jan 1986. doi: 10.1016/0021-9290(86)90136-3. URL <https://doi.org/10.1016%2F0021-9290%2886%2990136-3>.
- Nicholas P Linthorne, Maurice S Guzman, and Lisa A Bridgett. Optimum take-off angle in the long jump. *Journal of Sports Sciences*, 23(7):703–712, jul 2005a. doi: 10.1080/02640410400022011. URL <https://doi.org/10.1080%2F02640410400022011>.
- NP Linthorne, MS Guzman, and LA Bridgett. Optimum take-off angle in the long jump. *J Sports Sci*, 23: 703–12, Jul 2005b.
- Gordon Robertson; Graham Caldwell; Joseph Hamill; Gary Kamen; Saunders Whittlesey. *Research Methods in Biomechanics, Second Edition*. 2014.