
Sensorbasierte Erkennung und Analyse von Speerwürfen

Bachelor-Thesis
Sebastian Fenn
KOM-B-0694



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik
Fachbereich Informatik (Zweitmitglied)
Fachgebiet Multimedia Kommunikation
Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz

Sensorbasierte Erkennung und Analyse von Speerwürfen
Sensor-Based Javelin Throw Recognition and Analysis

Bachelor-Thesis
Studiengang: Informatik
KOM-B-0694

Eingereicht von Sebastian Fenn
Tag der Einreichung: 24. Mai 2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz
Betreuer: Philipp Müller

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Fachbereich Informatik (Zweitmitglied)

Fachgebiet Multimedia Kommunikation (KOM)
Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 und § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Sebastian Fenn, die vorliegende Bachelor-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß § 23 Abs. 7 APB überein.

Darmstadt, den 24. Mai 2021

Sebastian Fenn



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Ziel der Arbeit	3
1.3	Struktur der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Wurfbewegungen	5
2.1.1	Speerwurf	7
2.2	Bewegungsanalyse	11
2.2.1	Externe Sensoren	12
2.2.2	Tragbare Sensoren	13
2.2.3	Schlussfolgerung - Sensoren	14
2.2.4	Modelle	15
3	Stand der Forschung	17
3.1	Wurfanalysetools im Speerwurf	17
3.2	IMUs in der Wurfanalyse	18
3.2.1	Analyse der Wurftechnik	18
3.2.2	Messen des Abwurfs	20
3.3	Zusammenfassung	21
4	Konzept	23
4.1	Gütekriterien der Speerwurfbewegung	23
4.1.1	Phasen der Bewegung	23
4.1.2	Herausforderungen	24
4.2	Entwicklung des Systems	24
4.2.1	Befestigen der Sensoren	25
4.2.2	System	30
4.3	Zusammenfassung	37
5	Implementierung	39
5.1	Aufnahmen der Daten	39
5.2	Verarbeitung der Daten	40
5.3	Zusammenfassung	41
6	Evaluation	43
6.1	Ziel und Vorgehen	43
6.2	Auswertung	45
6.2.1	Ergebnisse	46
6.2.2	Analyse	50
6.3	Zusammenfassung	52
7	Fazit und Ausblick	55
7.1	Zusammenfassung	55
7.2	Ergebnisse	55



7.3 Zukünftige Arbeiten	56
Literaturverzeichnis	57

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beziehungen von Technik, Training und Analyse nach [KRS ⁺ 11]	6
2.2	Wurf-Verwindung beim Hammerwurf [KRS ⁺ 11]	7
2.3	Griffarten des Speers von oben [SJS13] a: Daumen-Zeigefinger-Griff, b: Zangengriff, c: Daumen-Mittelfinger-Griff	8
2.4	Speerwurfanlage [SJS13]	8
2.5	Teilkörper- und Speergeschwindigkeiten [KRS ⁺ 11]	8
2.6	Oberkörperrücklage nach dem Impulsschritt [KRS ⁺ 11]	9
2.7	Hüfteinsatz [KRS ⁺ 11]	10
2.8	Abwurf des Speers: Seit- und Rückansicht [KRS ⁺ 11]	11
2.9	Ablauf des Speerwurfs [SJS13]	11
2.10	Komplexe Aktivitäten bestehen aus Aktionen [LNL16]	12
2.11	Einsatz eines optoelektronischen Messsystems im Hammerwurf [WLW ⁺ 18]	13
2.12	Die verwendete IMU, entwickelt von [Dor19].	14
3.1	Aufnahmen und Analysieren des Bewegungsablaufs durch den Trainer mit Hilfe der App <i>Technique</i>	17
3.2	Die in [KSK ⁺ 10] untersuchte Pitching-Bewegung	19
3.3	Positionierung der Sensoren in [KSK ⁺ 10]	19
3.4	Befestigung der <i>motusBASEBALL</i> IMU (blau) am Wurfarm in [BMC ⁺ 19]	20
4.1	Betrachtete Zeitpunkte im in Abbildung 2.9 gezeigten Ablauf des Speerwurfs [SJS13]	24
4.2	Konfiguration A	25
4.3	Konfiguration B	25
4.4	Beschleunigungsdaten Konfig. A	26
4.5	Winkelgeschwindigkeiten Konfig. A	26
4.6	Beschleunigungsdaten Konfig. B	27
4.7	Winkelgeschwindigkeiten Konfig. B	27
4.8	Winkel der Hüftbewegung in Konfig. B	28
4.9	Daten einer um 90° um die y-Achse gedrehten IMU	28
4.10	An Oberarm und Hand gemessene Daten, bei einer Abwurfbewegung ohne Anlauf	29
4.11	Finale Positionen der Sensoren	29
4.12	Beispielhafte Aufnahme der Wurfbewegung mit der finalen Anbringung der Sensoren	30
4.13	Koordinatenachsen der Sensoren	31
4.14	Koordinatenachsen der Sensoren am Sportler	31
4.15	Ablauf der Armbewegung	32
4.16	Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Handsensors anhand der Beschleunigungsdaten	32
4.17	Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Stemmbeins anhand der Beschleunigungsdaten	33
4.18	Abheben des Druckbeins vor dem Setzen des Stemmbeins	34
4.19	Beschleunigungen an Druck- und Stemmbein mit Stemmschritt, Impulsschritt und versehentlich angenommenem Impulsschritt	34
4.20	Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Druckbeins anhand der Beschleunigungsdaten	35
4.21	Bewegung der Hüfte während des Hüfteinsatzes	35
4.22	Beschleunigung der Hüfte während des Hüfteinsatzes	35

4.23	Durch das System identifizierter Zeitpunkt des Hüfteinsatzes anhand der Beschleunigungsdaten	36
4.24	Ablauf der Auswertung	36
4.25	Identifizierte Zeitpunkte der in diesem Kapitel als Beispiel verwendeten Aufnahme	37
5.1	Screenshots der für das Aufnehmen der Daten genutzten App	39
5.2	Filtern der Beschleunigungsdaten der Hüfte	41
6.1	Konzeptzeichnung des Versuchsaufbaus bei Würfeln mit der rechten Hand	44
6.2	Ausschnitt eines der Analysebögen der Probanden	45
6.3	Fehlerhafte Befestigung des Hüftsensors	46
6.4	Korrektes Feedback	46
6.5	Übereinstimmendes Feedback von System und Trainer	47
6.6	Feedback des Systems übertrifft das des Trainers	48
6.7	Fehlerhaftes Feedback des Systems	48
6.8	Zusammensetzung des fehlerhaften Feedbacks	49

Zusammenfassung

Im Speerwurf, einer Disziplin der Leichtathletik, sind Analyse und Korrektur der Wurftechnik wesentlicher Bestandteil des Trainings- und Wettkampfbetriebs und tragen somit grundlegend zur Leistungssteigerung der Sportler bei. Um Trainer zu unterstützen, denen aufgrund der hohen Geschwindigkeiten leicht wichtige Details der Wurfbewegung entgehen können, kommen in einigen Fällen Werkzeuge der Bewegungsanalyse zum Einsatz. In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten und Grenzen der Erkennung, Analyse und Echtzeiteinschätzung von Speerwürfen mit Hilfe von körpergetragenen Sensoren ermittelt. Ziel ist es, Sportlern und Trainern eine einfache und ortsunabhängige Möglichkeit zu bieten, Bewegungsabläufe in Echtzeit bewerten zu lassen. Bisherige zu diesem Zweck genutzte Werkzeuge benötigen einen komplexen und ortsgebundenen Versuchsaufbau und erfolgen angesichts ihrer Komplexität nicht in Echtzeit. Aus diesem Grund sind sie im Trainings- und Wettkampfalltag nicht praktikabel. Die Erkenntnisse dieser Arbeit können außerdem auf ähnliche Wurfbewegungen mit Anlauf übertragen werden.

Zusammen mit Leichtathletik-Trainern werden zu überprüfende Parameter der Wurfbewegung identifiziert. Auf dieser Grundlage werden die genutzten Sensoren, die Anbringungsorte sowie das System zur Erkennung, Analyse und Bewertung des Bewegungsablaufs erarbeitet.

Das entwickelte System wird anschließend durch eine Studie mit über 30 Probanden verschiedener Leistungsklassen – von Anfängern bis zu Kaderathleten – evaluiert. Dabei wird die Auswirkung von Leistungsklassen der Sportler sowie von Rahmenbedingungen der Aufnahme auf das System betrachtet. Das System erweist sich als nützliches Werkzeug zur einfachen und ortsunabhängigen Analyse und Bewertung von Speerwurfbewegungen in nahezu Echtzeit.



1 Einführung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden Möglichkeiten der Erkennung und Analyse von Speerwurfbewegungen mit Hilfe von am Körper getragenen Sensoren entwickelt und diskutiert.

1.1 Motivation

Schnelle Bewegungen sind für das menschliche Auge schwer zu analysieren. Aus diesem Grund kommen in der Bewegungsanalyse schneller Abläufe im Sport immer häufiger Hilfsmittel zum Einsatz. Primär werden dafür zurzeit Videoanalyse-Tools verwendet. Die Nutzung dieser ist allerdings technisch aufwendig und nicht in allen Szenarien und Umgebungen möglich. Körpergetragene Sensoren zur Bewegungserkennung erfreuen sich immer größerer Beliebtheit und bieten eine preiswerte und einfach handzuhabende Möglichkeit, Bewegungen zu analysieren. Diese Arbeit soll Chancen und Grenzen bei der Erkennung und Analyse von Wurfbewegungen durch körpergetragene Sensoren, mit Schwerpunkt auf dem Speerwurf, erarbeiten.

Beim Speerwurf, einer Disziplin der Leichtathletik, die seit 1908 Bestandteil der olympischen Spiele ist, ist es das Ziel, nach einer Anlaufbewegung das Wurfgerät, den Speer, möglichst weit zu werfen. Die Wurfbewegung erfolgt dabei entlang der Laufrichtung, weshalb der Speerwurf zur Kategorie der sogenannten translationalen Würfe gehört [NBN⁺19]. In diese Kategorie lassen sich außerdem Wurfbewegungen wie Schlagball-, Baseball-, Handball- und weitere Überkopfwürfe in Blick- oder Laufrichtung einordnen. Entscheidend für das Ergebnis des Speerwurfs, die Weite, ist neben der Kraft des Werfenden vor allem die technische Ausführung des Bewegungsablaufs. Aus diesem Grund ist deren Analyse und Verbesserung essentieller Bestandteil des Trainings- sowie des Wettkampfbetriebs.

Computergestützte und zugleich ortsunabhängig einsetzbare Lösungen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht üblich. Einzig die Aufnahme von Videomaterial vor Ort, auf dessen Basis anschließend eine manuelle Einschätzung erfolgen kann, kommt teilweise zum Einsatz. Auch in Sportarten mit vergleichbaren Wurfbewegungen existiert zurzeit kein sensorbasiertes System zur Analyse der Kombination von Wurfbewegung und Anlauf. Diese Aufgabe wird meist durch einen Trainer und ohne computer- oder sensorgestützte automatisierte Analysetools durchgeführt. Dabei können dem Trainer, aufgrund der vergleichsweise hohen Geschwindigkeit und Komplexität des Bewegungsablaufs und der dadurch eingeschränkten Sichtbarkeit einiger Parameter, je nach Erfahrung und Kompetenz, essentielle Fehler im Bewegungsablauf entgehen [WLW⁺18]. Das Eliminieren des Geschwindigkeitsaspekts mit Hilfe des Videomaterials vor Ort verbessert die Korrektheit der Rückmeldungen, unterliegt jedoch trotz allem der subjektiven Einschätzung des Trainers. Auch in diesem Fall lassen sich eingeschränkt sichtbare Parameter, durch verdeckte oder sehr kleine Körperbewegungen, nicht eindeutig identifizieren.

Hinzu kommt, dass nicht in jeder Situation ein geeignet geschulter Trainer zur Hand ist, welcher den Athleten in seinem Training unterstützen kann. Die Zuverlässigkeit der Rückmeldung an den Sportler soll daher durch die Verwendung von am Körper getragenen Sensoren verbessert werden, um Trainer sowie Sportler als Werkzeug für die detaillierte Echtzeitanalyse zu unterstützen. Es besteht dabei die Möglichkeit, erarbeitete Konzepte zur Analyse von Speerwürfen auf andere Sportarten translationaler Überkopfwürfe mit Anlauf zu übertragen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen sensorbasierter, automatischer Analysetools im Speerwurf zu erarbeiten und zu evaluieren.

Für die Entwicklung der Ansätze ist ein Verständnis der Bewegung sowie das Abstrahieren wesentlicher

Parameter von großer Bedeutung. Ausgehend von diesen Parametern muss anschließend die Möglichkeit ihrer Detektion mit Hilfe von Sensoren ermittelt werden. Dazu müssen die Anzahl von benötigten Sensoren sowie geeignete Befestigungspunkte dieser gefunden werden. Zum Vergleich der Daten und Beurteilung der Wurfbewegung muss außerdem ein Modell eines idealen Wurfablaufs erarbeitet werden. Auf Grundlage dieses Modells soll dem Nutzer dann eine Einschätzung und Bewertung des Bewegungsablaufs zurückgemeldet werden.

Die Rückmeldung durch das System wird in der Evaluation anschließend mit Hilfe von detaillierten Videoaufnahmen des Bewegungsablaufs überprüft und mit den Einschätzungen durch Leichtathletik-Trainer der Probanden verglichen. Dabei werden die Probanden je nach Leistungsniveau in Gruppen eingeteilt, um die Genauigkeit des Systems bei unterschiedlichen Zielgruppen zu ermitteln. Außerdem werden die Evaluationsdaten unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen gesammelt um die Nutzbarkeit des Systems unter verschiedenen Voraussetzungen zu prüfen. Unterscheiden sich die Einschätzungen von System und Trainer, wird zusammen mit dem Trainer zusätzlich die Rückmeldung des Systems mit Hilfe der Videoaufnahmen detailliert analysiert, um zu beurteilen, ob es sich um einen Fehler des Systems handelt oder um einen übersehenen Aspekt auf Seiten des Trainers, den das System in solchen Fällen unterstützen können soll. Auf Grundlage dieser Daten sollen Genauigkeit, Verwendbarkeit sowie Effektivität des Ansatzes im Trainingsalltag eingeschätzt werden.

1.3 Struktur der Arbeit

In Kapitel 2 erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe, Ansätze und Technik. Im darauf folgenden Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der sensorbasierten Wurfanalyse besprochen. Kapitel 4 beschreibt die Herangehensweise sowie das Konzept zur Entwicklung des Analysesystems. Dabei werden zuerst die Gütekriterien für den Ablauf der Speerwurf-Bewegung erarbeitet. Anschließend wird die Anordnung der Sensoren am Körper diskutiert und auf Basis der zuvor festgelegten Gütekriterien und Sensorpositionen ein System zur automatisierten Bewertung der Würfe entwickelt. Kapitel 5 beschreibt die Implementierung des Systems sowie der zur Evaluation genutzten Android-App. Die Beschreibung von Durchführung und Auswertung der Evaluation, sowie die Diskussion und Einschätzung der Ergebnisse dieser, ist Thema von Kapitel 6. In Kapitel 7 wird ein Fazit des Ansatzes gezogen. Außerdem werden Ideen für zukünftige Entwicklungen vorgestellt.

In dieser Arbeit wird aufgrund der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum für alle Geschlechter verwendet.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel gibt eine kurze Einführung in Wurfbewegungen im Allgemeinen sowie den Ablauf der Wurfbewegung von Speerwürfen im Speziellen. Des Weiteren werden technische Methoden und Hilfsmittel beschrieben, die eine automatisierte Analyse der Wurfbewegungen ermöglichen sollen.

2.1 Wurfbewegungen

Würfe sind Teil vieler verschiedener Sportarten. Dabei werden unterschiedliche Wurfgeräte mit Fokus auf Präzision, wie zum Beispiel im Basketball oder im Baseball, oder auf Weite, wie in den Wurfdisziplinen der Leichtathletik, geworfen [Yu18]. In dieser Arbeit steht das Werfen auf Weite, eine azyklische Schnellkraftbewegung, im Mittelpunkt. Im Folgenden wird diese Bewegung am Beispiel der Wurfdisziplinen der Leichtathletik (siehe Tabelle 2.1) nach der offiziellen Definition des Deutschen Leichtathletik-Verbands in [KRS⁺11] erläutert.

<u>Disziplin</u>	<u>Gewicht Wurfgerät</u>	<u>Bewegungsform</u>	<u>Ausgangsposition</u>
Diskuswerfen	leicht	Rotation	rückwärts
Speerwerfen	leicht	Translation	vorwärts
Hammerwerfen	schwer	Rotation	rückwärts
Kugelstoßen	schwer	Translation/ Rotation	rückwärts

Tabelle 2.1: Würfe der Leichtathletik, Klassifiziert nach [DP02]

Die Flugweite des Wurfgerätes wird vor allem durch dessen Abfluggeschwindigkeit bestimmt. Hinzu kommen modifizierende Faktoren wie Abflugwinkel, Abflughöhe, aerodynamische Eigenschaften des jeweiligen Geräts sowie Windstärke und Windrichtung [KRS⁺11]. Innerhalb des Rahmens der jeweiligen Regelwerke ist es dem Sportler dabei möglich, zwischen verschiedenen Geräteeigenschaften zu wählen. Dies ist vor allem bei Geräten mit aerodynamischen Eigenschaften, wie dem Speer oder Diskus, besonders wichtig. Die Abfluggeschwindigkeit hängt dabei weniger von der Kraft des Werfenden, sondern vielmehr von der technischen Ausführung der Wurfbewegung ab [Yu18, KRS⁺11]. Athleten müssen dabei auf engem Raum hohe Geschwindigkeiten entwickeln und gleichzeitig technisch-koordinativ den Bewegungsablauf kontrollieren können. Dies ist wichtig, da dem Wurfgerät zum einen eine möglichst hohe Geschwindigkeit im richtigen Abwurfwinkel und in die richtige Richtung mitgegeben werden muss, zum anderen muss der Körper des Athleten so kontrolliert werden, dass dieser nicht übertritt und dadurch den Wurf ungültig macht. Um die Technikausbildung, nach [KRS⁺11] die höchste Priorität des Wurftrainings, zu unterstützen und einen empfohlenen optimalen Bewegungsablauf für den Sportler vorzugeben, gibt es die sogenannten Technikleitbilder. Diese Leit- oder Zieltechniken sollen dabei helfen, ein bestmögliches Ergebnis zu erreichen und haben sich über eine lange Zeit des Leistungssports entwickelt. In einigen Disziplinen sind die Zieltechniken über Jahrzehnte hinweg nur gering angepasst worden, zum Beispiel im Speerwurf. In anderen Disziplinen, wie zum Beispiel dem Diskuswurf, kam es wiederum zu gravierenden Änderungen bis heute. Des Weiteren gibt es Disziplinen wie das Kugelstoßen, in denen unterschiedliche konkurrierende Lösungsvarianten existieren. Weiterentwicklungen der Leittechniken sind aus diesem Grund denkbar, aber durch die Einschränkungen von Regeln und Sicherheitsauflagen der Disziplinen begrenzt. Leittechniken sind dabei nie auf jeden Athleten gleichermaßen übertragbar, sondern sollen vor allem zur Orientierung dienen und an die individuellen anatomischen, koordinativ-technischen und konditionellen Voraussetzungen angepasst werden. Leistungsdiagnostiker und Trainingswissenschaftler spielen, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, bei der Ent-

wicklung und Verfeinerung des Technikleitbilds eine wichtige Rolle. Unterstützend kommen dabei Messtechniken zum Einsatz, die eine präzise Analyse und eine Vielzahl von Detailinformationen liefern sollen. Diese dienen sowohl der Steuerung als auch dem Verständnis der Bewegung. Genutzte Techniken sind zum Beispiel Videokameras, Lichtschranken und Kraftmessplatten, die vielfach kombiniert werden können und computergestützt arbeiten. In Kapitel 3 wird auf diese Techniken noch einmal detaillierter eingegangen.

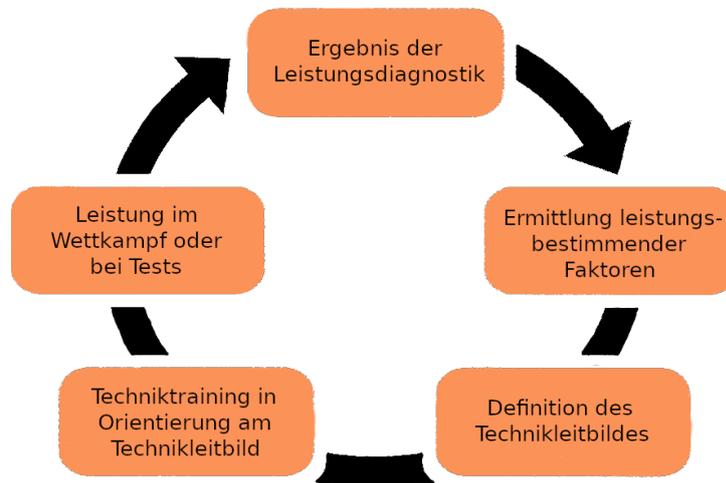


Abbildung 2.1: Beziehungen von Technik, Training und Analyse nach [KRS⁺11]

Um einen großen Abwurfimpuls zu erreichen, muss das gesamte Athlet-Werfer-System vorbeschleunigt werden. Ziel dabei ist es, den Beschleunigungsweg des Wurfgerätes zu verlängern. Die Kraft für die Beschleunigung des Gesamtsystems kommt dabei hauptsächlich aus den Beinen, je nach Disziplin durch Anlaufen, Angleiten oder Andrehen.

Die sogenannte Verwringung bezeichnet die schraubenartige Verdrehung des Hüftbereichs. Die Schulterachse wird dabei gegen die Hüftachse und die Hüftachse gegen die Fußachse verdreht (siehe Abbildung 2.2). Dies hat den Effekt, dass zusätzlich zur großen geraden Streckmuskulatur schräg wirkende Muskulatur zum Einsatz kommt. Dieser deutliche Spannungsaufbau der Muskulatur löst nachfolgend eine reaktive, erhöhte Muskelarbeit aus. Die Muskulatur arbeitet in kurzer Folge erst exzentrisch (Widerständen entgegenwirkend) und anschließend konzentrisch (Widerstände überwindend) dem sogenannten Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVK)¹ folgend [KRS⁺11]. Zusätzlich zur höheren Muskelleistung ermöglicht die Verwringung außerdem einen längeren Beschleunigungsweg. Während der Verwringung wird die Beschleunigung des Wurfgerätes kurzzeitig verzögert, Beine und Hüfte überholen den Oberkörper. Nachdem beide Füße ihre finale Stützposition erreicht haben, beginnt die Hauptbeschleunigungsphase. Dabei wird die Energie über die Beine auf das wurfseitige Handgelenk übertragen. Zuerst wird dabei das wurfseitige Hüftgelenk in eine zur Abwurflinie parallele Stellung gestreckt. Die Schulterachse hingegen wird weiterhin zurückgehalten. Dadurch nimmt die Verwringung noch einmal zu. Ist die Hüftachse weitgehend gestreckt, so erfolgt nun die Freigabe der Schulterachse auf der Schwungseite. Der Kraftstoß der Hüfte wird von dort aus über Oberkörper, Schulter, Arm, Unterarm und Hand auf das Wurfgerät übertragen. Dabei nimmt idealerweise die Geschwindigkeit der Teilkörper aufgrund der stetig geringer werdenden Gesamtmasse ununterbrochen zu. Ein zeitgleiches Blockieren der Gegenschulter erhöht zusätzlich die Energieübertragung auf die Wurfseite. Durch die im Abwurf vom Oberkörper auf das Wurfgerät übertragene Geschwindigkeit verliert der Restkörper des Werfenden deutlich an Geschwindigkeit. Geht diese gegen Null, so spricht man von einem Standabwurf. Bleibt nach dem Abwurf noch eine Rest-

¹ <https://medlexi.de/Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus> – zuletzt aufgerufen am 19.12.2020

geschwindigkeit, so muss der Sportler versuchen, durch eine Ausgleichbewegung seinen Körper im Ring beziehungsweise vor der Abwurfline zu halten.

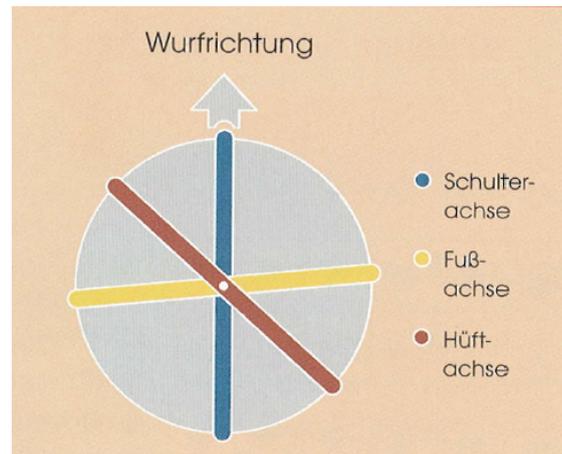


Abbildung 2.2: Wurf-Verwringung beim Hammerwurf [KRS⁺11]

2.1.1 Speerwurf

Die Erörterung des Speerwurfs sowie dessen Technik in diesem Kapitel basiert auf den offiziellen Veröffentlichungen des Deutschen Leichtathletik-Verbands DLV [KRS⁺11] sowie auf denen des Leichtathletik-Weltverbandes IAAF [SJS13]. Des Weiteren wird in der Arbeit von einem rechtshändig Werfenden ausgegangen. Die Bewegungsabläufe für Linkshänder sind allerdings identisch, mit vertauschten Rollen der Seiten links und rechts und werden im Folgenden auch so behandelt.

Der Speerwurf ist seit 1906 (olympische Zwischenspiele) beziehungsweise 1908 olympisch. Er ist dabei unter den Wurfdisciplinen der Leichtathletik die Disziplin mit dem längsten und die einzige mit geradlinigem Beschleunigungsweg (siehe Tabelle 2.1). Wurftechniken mit Drehungen um die Körperachse sind dabei heutzutage vom Weltverband aufgrund der Unfallgefahr verboten. Nach offiziellem Regelwerk muss der Speer am Griff gefasst (siehe Abbildung 2.3) und über die Schulter beziehungsweise den oberen Teil des Wurfarmes geworfen werden. Der Werfer darf während des Wurfs nicht die Abwurfline (siehe Abbildung 2.4) übertreten. Die Weite des Wurfs wird senkrecht zur Abwurfline bestimmt.

Der Speerwurf ist ein sogenannter Schlagwurf, da Speere ein geringes Gewicht aufweisen und es somit zu sehr hohen Abwurfgeschwindigkeiten kommt. Bei einem Schlagwurf sind vor allem die Endbeschleunigungen von Unterarm und Hand von großer Bedeutung. Dabei ist eine präzise Koordination der Teilkraft aufgrund der sehr hohen Beschleunigung des Wurfgerätes unabdingbar [KRS⁺11]. Die im Anlauf aufgebaute Anfangsbeschleunigung wird ab Setzen des Stemmschritts bis zum Abwurf von Unterkörper über Oberkörper, Schulter, Wurfarm, Unterarm und Hand auf den Speer übertragen. Dabei verlieren die größeren energieabgebenden Einheiten deutlich an Geschwindigkeit zugunsten der energiegewinnenden kleineren (siehe Abbildung 2.5). Die Sportwissenschaft teilt die Wurfbewegung des Speeres in vier Phasen ein. Diese sind die zyklische und die azyklische Anlaufphase, die Abwurfbewegung sowie das Abfangen des Körpers. In der Regel machen Athleten zwischen elf und fünfzehn Schritte bis zum Abwurf. Der zyklische Teil des Anlaufs besteht üblicherweise aus vier bis acht Schritten. Diese Phase besteht aus einem lockeren Steigerungslauf auf dem Fußballen zur Vorbeschleunigung des Gesamtsystems. Der Speer wird dabei über Schulterhöhe entweder waagrecht oder mit der Spitze leicht nach unten getragen. Die Geschwindigkeit des Laufs sollte dabei vom technischen Können des Athleten abhängig gemacht werden.

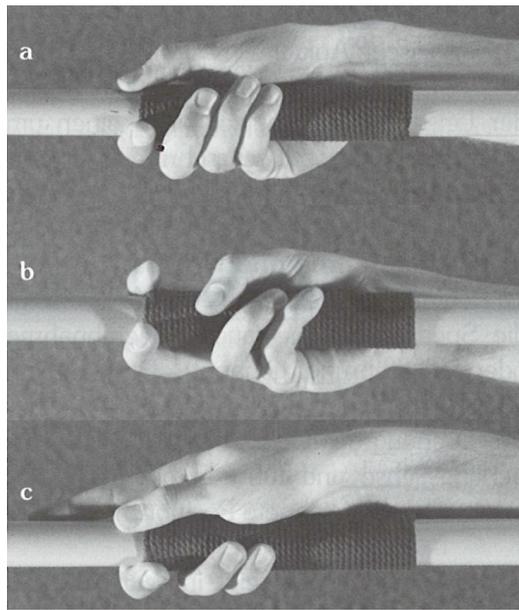


Abbildung 2.3: Griffarten des Speers von oben [SJS13]
 a: Daumen-Zeigefinger-Griff, b: Zangen-griff, c: Daumen-Mittelfinger-Griff

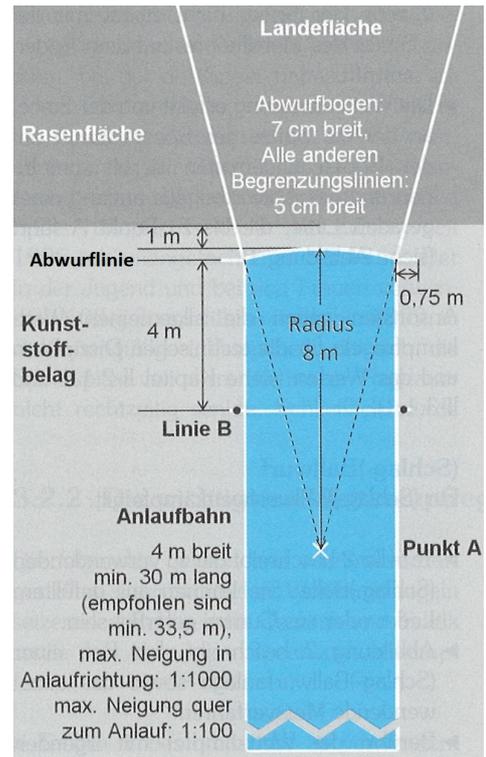


Abbildung 2.4: Speerwurfanlage [SJS13]

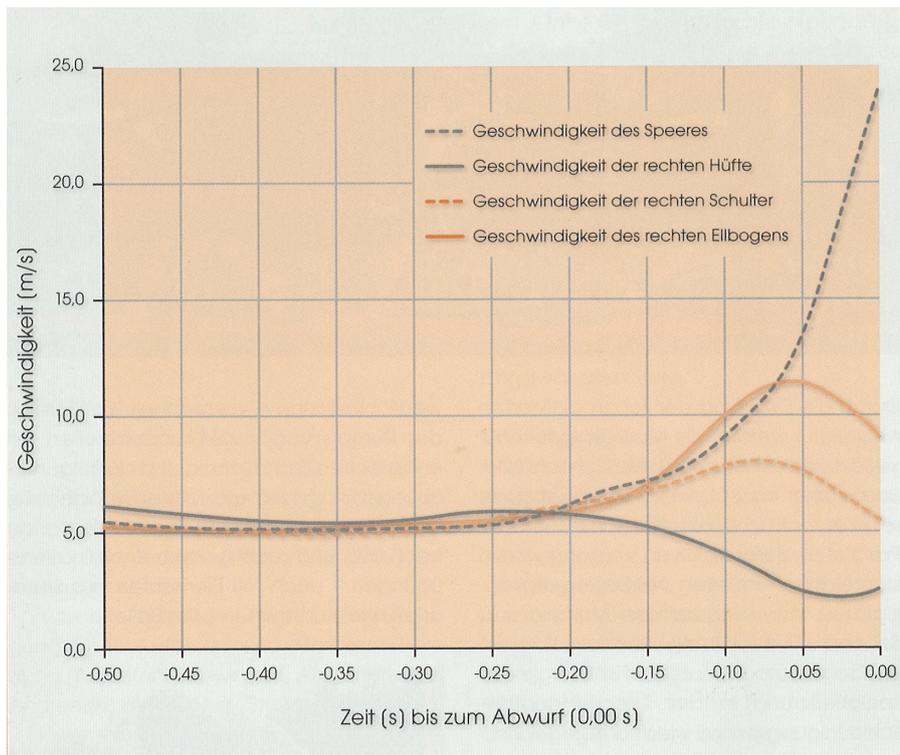


Abbildung 2.5: Teilkörper- und Speergeschwindigkeiten [KRS⁺11]

Der azyklische Teil des Anlaufs, der üblicherweise ein fünf- beziehungsweise sieben-Schritt-Rhythmus ist, besteht aus der Speerrückführung sowie der Abwurfvorbereitung bei geringfügig zunehmender Geschwindigkeit. In diesem Bewegungsabschnitt wird der Hauptteil der Energie, die schlussendlich auf den Speer übertragen wird, erzeugt. Alle Aktionen haben dabei einen direkten Einfluss auf die techni-

sche Ausführung und somit auf die Abwurfgeschwindigkeit. Die maximale Anlaufgeschwindigkeit des Athleten soll dabei im dritt- und vorletzten Schritt erreicht sein. Ein Geschwindigkeitsabfall im drittletzten Schritt ist als bewegungstechnischer Fehler zu werten. Die Horizontalgeschwindigkeit des Körpers soll im besten Fall erst im letzten Schritt durch Impulsübertragung von den Beinen über Rumpf, Schulter und Wurfarm auf das Gerät übergehen. Eine gute Abwurfvorbereitung, also das Aufbauen der Körperspannung durch Übersetzen des rechten Beins, lässt sich durch das optimale Verhältnis eines langen Impulsschritts zu einem kurzen Stemmschritt im Verhältnis drei zu zwei beschreiben [KRS⁺11]. Als Impulsschritt wird der explosive vorletzte Schritt des Anlaufs bezeichnet, welcher durch das sogenannte Druckbein durchgeführt wird. Bei diesem "überholen" die Beine den Oberkörper, sodass eine Rücklage entsteht. Beim darauf folgenden Stemmschritt wird das linke Bein schnell, aktiv und stabil aufgesetzt, um mit dem rechten Bein und der rechten Hüfte Druck gegen die fixierte linke Körperhälfte aufzubauen. Kenngrößen, die die Abwurfvorbereitung sowie den Abwurf charakterisieren, sind dabei die Folgenden:

Die *Oberkörperrücklage* hat während des letzten Schritts Einfluss auf die Geschwindigkeitsübernahme vom Anlauf zum Abwurf. Sie ist dabei unverzichtbar bei der Energieübertragung von Beinen und Rumpf auf den Speer, eine zu starke Rücklage beim Setzen des Druckbeins bremst den Sportler allerdings zu sehr. In diesem Fall verliert der Werfende schon vor dem finalen Beschleunigungsimpuls einen Teil seiner Anlaufenergie. Die optimale Rücklage garantiert einen langen Beschleunigungsweg der Wurfhand und hält die Bremswirkung nach dem Setzen des Druckbeins so gering wie möglich. Der Körperschwerpunkt sollte sich dafür bei der Landung so nah wie möglich an der Stützstelle des Fußes befinden. Als Orientierung gilt, dass die Wurfarm-Gegenschulter sich beim Setzen des Druckbeins über dessen Fuß befinden sollte (siehe Abbildung 2.6).



Abbildung 2.6: Oberkörperrücklage nach dem Impulsschritt [KRS⁺11]

Um einen effektiven Spannungsaufbau in der Hüfte zu erzeugen ist der sogenannte *Hüfteinsatz* vonnöten. Dieser dient dazu, die Energie der Beine auf Oberkörper und Speer zu übertragen. Er beschreibt die Zeit vom Aufsetzen des Druckbeins bis zum nach unten schlagenden Aufsetzen des Stemmbeins. In diesem Zeitraum wird die rechte Hüfte nach vorne geschoben, um eine große Körperspannung auf der rechten Seite (rechte Schulter und rechter Arm) zu erzeugen, die erst im Abwurf gelöst wird (siehe Abbildung 2.7). Das Druckbein soll dabei nach Setzen des Impulsschritts im Knie möglichst wenig nachgeben. Das Stemmbein hingegen sollte zum Zeitpunkt des Setzens möglichst gestreckt sein (größer als 160°) (siehe Abbildung 2.7).

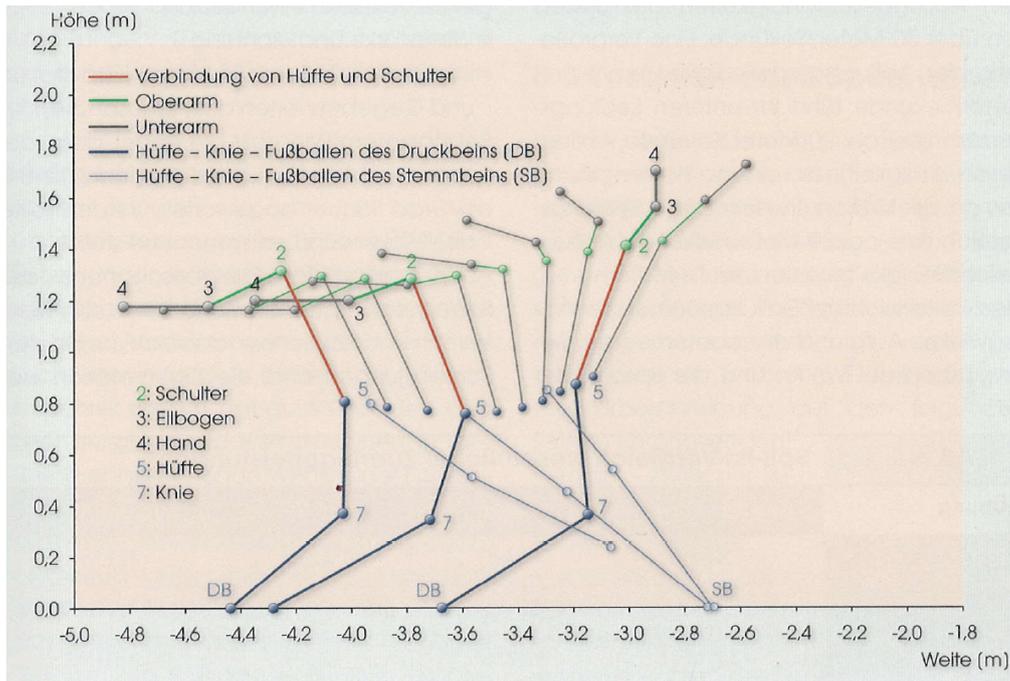


Abbildung 2.7: Hüfteinsatz [KRS⁺11]

Ein *Abknicken des Rumpfs*, also die seitliche Neigung des Rumpfs in vertikaler Ebene, sowie die Verwirrung des Oberkörpers, also die Abweichung der Frontalebene der Schulter im Bezug auf die Wurfrichtung, deuten auf eine Ausweichbewegung in der Abwurfphase hin. Diese mindert die Energieübertragung in Wurfrichtung und sollte daher vermieden werden. Der *Abwurfwinkel* beschreibt den Winkel der Flugrichtung des Speers zur Horizontalen zum Zeitpunkt des Abwurfs (siehe Abbildung 2.8). Dieser soll bei geringem Wind zwischen 34° und 38° liegen [KRS⁺11]. Je nach herrschenden Windverhältnissen muss dieser angepasst werden. Bei Gegenwind ist ein flacherer und bei Rückenwind ein steilerer Abwurfwinkel zu wählen. Der Abwurfwinkel wird dabei durch eine durch Abwurfpunkt und dem Punkt des Speeres 0,04 Sekunden nach dessen Abwurf gezogenen Geraden im Verhältnis zur Horizontalen ermittelt (siehe Abbildung 2.8). Der sogenannte *Anstellwinkel* beschreibt den Winkel des Speers zur Horizontalen zum Zeitpunkt des Abwurfs. Im Idealfall stimmen Anstell- und Abwurfwinkel überein, eine Differenz von über 5° zwischen den beiden ist als technischer Fehler zu werten [KRS⁺11].

Die seitliche Abweichung des Speers von der Abwurfrichtung wird durch den *Verkantungswinkel* beschrieben (siehe Abbildung 2.8). Je größer dieser ist, desto größer ist der Strömungswiderstand des Speers, was eine geringere Flugweite zur Folge hat. Ein Verkantungswinkel über 10° wird als Fehler gewertet [KRS⁺11].

Auf Abwurf-, Anstell- und Verkantungswinkel wird im Rahmen der Arbeit nicht näher eingegangen, da diese aufgrund ihrer Abhängigkeit von Windstärke und Windrichtung individuell gehandhabt werden müssen und es somit nicht möglich ist, ein allgemeingültiges Modell aufzustellen. Aus diesem Grund konzentriert sich diese Arbeit auf die leistungsbestimmende Einflussgröße der Abfluggeschwindigkeit, die ihr vorangehende Ausführung des technischen Bewegungsablaufs. Laut [KRS⁺11] sind zur Kennzeichnung und Einschätzung der Speerwurftechnik die Abwurfvorbereitung – also der Übergang vom Anlauf zum Abwurf – sowie die Abwurfbewegung besonders relevant.

Der zuvor beschriebene ideale Ablauf des Speerwurfs ist in Abbildung 2.9 noch einmal bildlich zu sehen.

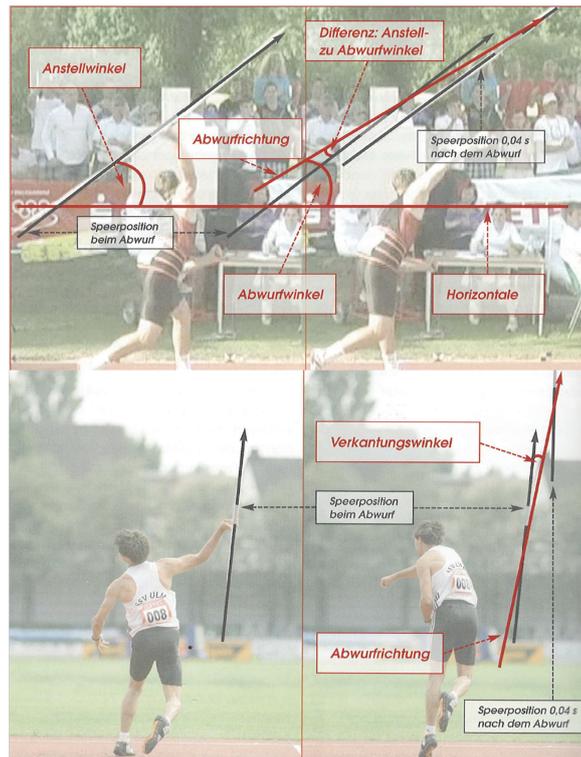
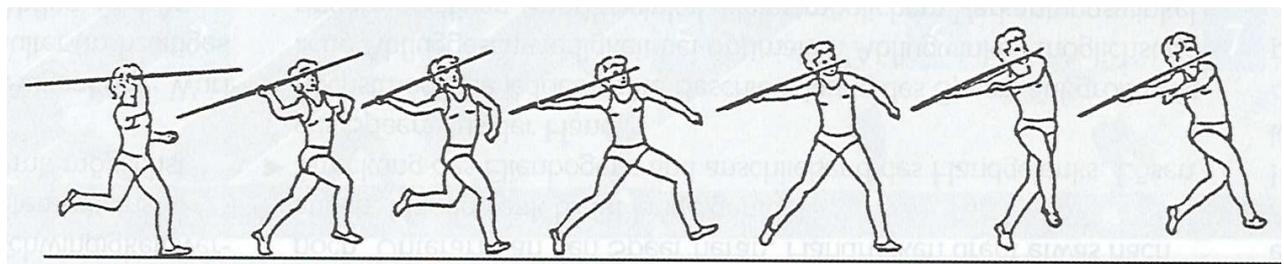
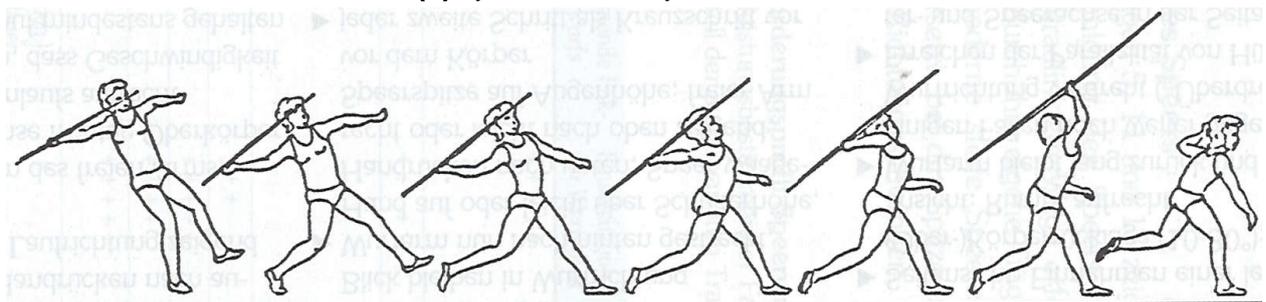


Abbildung 2.8: Abwurf des Speers: Seit- und Rückansicht [KRS⁺11]



(a) Zyklischer und azyklischer Anlauf



(b) Von der Abwurfbewegung bis zum Abfangen

Abbildung 2.9: Ablauf des Speerwurfs [SJS13]

2.2 Bewegungsanalyse

Bei der automatisierten Bewegungsanalyse werden Daten über die ausgeführten Bewegungsabläufe gesammelt und anschließend mithilfe von Modellen klassifiziert. Die Daten für die Erkennung und Analyse der Aktivitäten werden dabei mit Hilfe von Sensoren erfasst, die in zwei Kategorien – *extern* und *tragbar* – unterteilt werden können. Die Forschung im Gebiet der Sensoren sowie ihre Verfügbarkeit hat in den

vergangenen Jahren stark zugenommen. So werden heutzutage vor allem repetitive, nicht-sequentielle, nicht-nebenläufige und nicht-verschachtelte Aktivitäten, wie Laufen, Springen, Sitzen, sogenannte Aktionen, von diversen Fitness-Apps mithilfe der Sensoren in Smartphones und Smartwatches erkannt [LNLR16]. Menschliche Bewegungsabläufe bestehen dabei meist aus sequentiellen, nebenläufigen oder verschachtelten Aktionen über die Zeit. Diese Kombinationen werden als komplexe Aktivitäten bezeichnet (Abbildung 2.10).

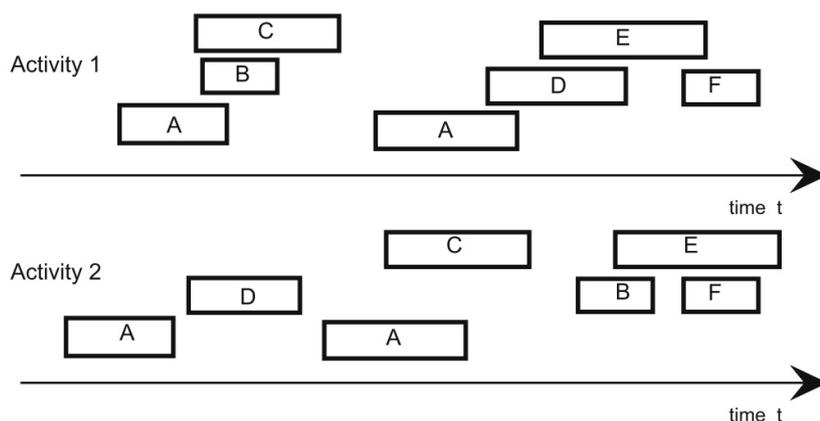


Abbildung 2.10: Komplexe Aktivitäten bestehen aus Aktionen [LNLR16]

2.2.1 Externe Sensoren

Externe Sensoren sind meist stationär. Der Nutzer muss sich aus diesem Grund in einem von den Sensoren einsehbaren Bereich befinden, um erkannt zu werden.

Kameras sind die bekanntesten Vertreter externer Sensoren, die auch im Alltag Anwendung finden können. [NBN⁺19] unterscheidet bei Bewegungserkennungssystemen mit externen Sensoren zwischen zwei Kategorien, dem visuellen Tracking-System und dem optoelektronischen Messsystem.

Visuelles Tracking-System

Beim visuellen Tracking-System wird die Position des Ziels mittels Kameras bestimmt. Dafür wird jedes aufgenommene Einzelbild analysiert um das zu verfolgende Objekt zu identifizieren. Diese Systeme nutzen mehrere Kameras um mit Hilfe von Triangulation² das Ziel im dreidimensionalen Raum zu erfassen.

Optoelektronisches Messsystem

Diese Methode basiert auf der Erkennung von Markern, die auf dem zu erkennenden Objekt angebracht werden. Erkannt werden diese von Kameras, die sich an festen Positionen befinden. Die Präzision dieses Systems ist dabei abhängig von der Anzahl der Kameras, dem Blickfeld der Kameras sowie der Anzahl der auf dem Objekt befestigten Marker (siehe Abbildung 2.11).

² [https://books.google.de/books?id=_f7oBQAAQBAJ&q="optical+3D+measuring"&redir_esc=y#v=snippet&q="optical3Dmeasuring"&f=false](https://books.google.de/books?id=_f7oBQAAQBAJ&q=) – zuletzt aufgerufen am 8.1.2021

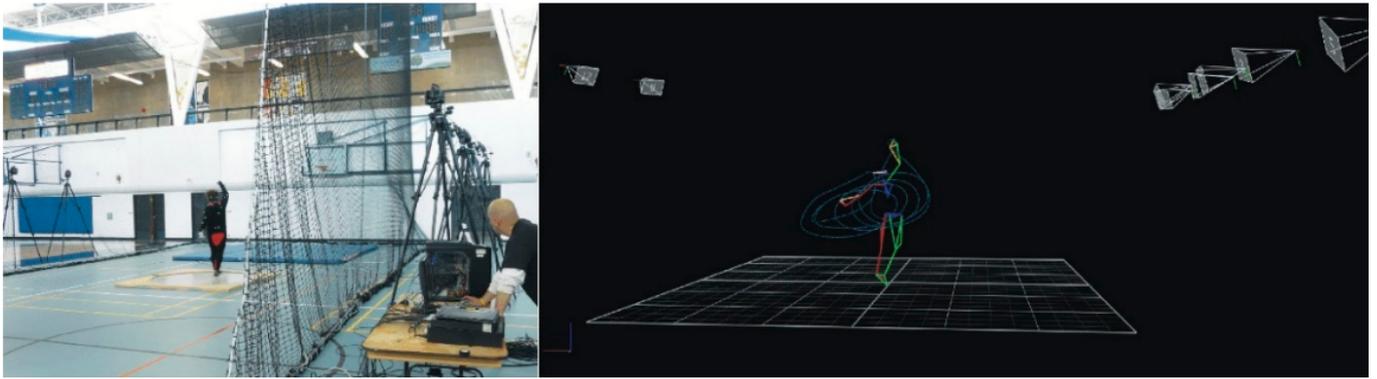


Abbildung 2.11: Einsatz eines optoelektronischen Messsystems im Hammerwurf [WLW⁺18]

2.2.2 Tragbare Sensoren

Diese Sensoren werden vom Nutzer direkt am Körper getragen. Im Rahmen der Bewegungserfassung, nennt [NBN⁺19] die Kategorien des elektromagnetischen Messsystems sowie die inertielle Messeinheit (englisch: inertial measurement unit), kurz IMU. Im Folgenden werden diese vorgestellt.

Elektromagnetisches Messsystem

Das elektromagnetische Messsystem besteht aus Sensoren und Transmittern. Der Transmitter ist dabei eine Antenne, die ein magnetisches Feld erzeugt. Die Antenne ist hierbei meist an einem festen Punkt installiert. Die tragbaren Sensoren werden am Zielobjekt befestigt. Sie erhalten einen magnetischen Feldwert, sodass daraus Ort und Orientierung des zu erkennenden Objekts herleitbar sind. Diese Methode findet vor allem in medizinischen Bereichen Anwendung.

Inertielle Messeinheit

Zur Erkennung physikalischer Bewegungen wird häufig die Kombination verschiedener Sensoren auf einer Platine, die sogenannte inertielle Messeinheit genutzt. Am häufigsten auf IMUs vertreten sind dabei Beschleunigungssensoren und Gyroskope [NBN⁺19]. Sie ermöglichen grundlegende Trägheitsmessungen und sind verhältnismäßig preiswert. Nach [HMZ⁺13] können IMUs alle nötigen Daten zur Ganzkörper-Bewegungserkennung liefern.

In dieser Arbeit wird auf die von Pascal Dornfeld in [Dor19] entwickelten IMUs zurückgegriffen. Diese bestehen aus einem triaxialen Beschleunigungssensor und einem triaxialen Gyroskop. Diese Sensoren liefern die Beschleunigung und die Winkelgeschwindigkeit entlang der x-, y- und z-Achse eines Koordinatensystems. Diese sechs Freiheitsgrade (englisch: degree of freedom), kurz DoF können die Bewegung eines starren Körpers im dreidimensionalen Raum beschreiben. Zur Datenübertragung an ein bluetoothfähiges Gerät wird Bluetooth Low Energy³ verwendet. Als Energiequelle dient eine Knopfatterie, die auf der Rückseite des Boards befestigt wird. Aufgrund der kompakten Bauweise ist es möglich, die IMUs am Körper zu tragen, zum Beispiel in Schweißbändern.

Beschleunigungssensoren und Gyroskope

Aufgrund ihres geringen Anschaffungspreises und des verhältnismäßig geringen Energieverbrauchs sind Beschleunigungssensoren und Gyroskope in der Bewegungserkennung weit verbreitet [COZV17]. Zu finden sind sie zum Beispiel in Mobilgeräten wie Smartphones, Smartwatches und Fitnessstrackern. Der

³ <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/radio-versions/> – zuletzt aufgerufen am 10.5.2021

Beschleunigungssensor misst dabei die Eigenbeschleunigung des Sensors. Gyroskope messen die Winkelgeschwindigkeiten von Rotationen um die Dimensionsachsen des dreidimensionalen Raums. Dies geschieht bei den meisten modernen Beschleunigungssensoren und Gyroskopen mit Hilfe drei orthogonal zueinander liegender Sensor-Achsen.



Abbildung 2.12: Die verwendete IMU, entwickelt von [Dor19].

Positionierung und Verwendung von Sensoren

Die Positionierung des Sensors spielt bei der Erkennung der Aktivität eine wichtige Rolle [COZV17]. IMUs, die an der Hüfte angebracht sind, werden vor allem zur Erkennung globaler Körperbewegungen genutzt. Dies liegt daran, dass die Körpermitte in vielen Fällen stabiler als die Extremitäten ist. Platzierungen an den Extremitäten liefern Daten lokaler Bewegungen. Die Anbringung an den Gliedmaßen wird auch dank Smartwatches und Fitnesstrackern immer populärer [COZV17].

Zusätzlich zu den Positionen ist die Anzahl der Sensoren zu beachten. Mehr Sensoren liefern tendenziell mehr Informationen, wichtig ist es dabei jedoch einen Weg zu finden, so viele Daten wie nötig mit so wenig Sensoren wie möglich zu erhalten. Zum einen soll der Komfort des Sportlers so wenig wie möglich eingeschränkt werden, um keinen großen Einfluss auf die Ausführung des Bewegungsablaufs durch störende Sensoren zu haben. Zum anderen ist es von Vorteil, die durch eine höhere Anzahl von Sensoren verursachte zusätzliche Komplexität sowie den dadurch erhöhten Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten.

2.2.3 Schlussfolgerung - Sensoren

Tragbare Sensoren haben im Vergleich zu externen Sensoren den Vorteil, ohne viel Aufwand und erst zu schaffende Rahmenbedingungen genutzt werden zu können. Dies bietet die Möglichkeit, sie ohne großen Mehraufwand in den Trainingsalltag zu integrieren. Des Weiteren ist eine Echtzeitanalyse der Daten externer Sensoren am Wettkampf- oder Trainingsort aufgrund der großen Datenmengen und der dadurch benötigten Rechenleistung schwer möglich [WLW⁺18]. Im Trainings- und Wettkampfbetrieb, bei denen eine zügige Rückmeldung an den Sportler erfolgen sollte, sind sie deshalb der Analyse mittels IMU Daten, die nahezu in Echtzeit erfolgen kann, unterlegen.

2.2.4 Modelle

Um Bewegungsabläufe zu erkennen und zu klassifizieren, müssen die erfassten Daten mit einem Modell verglichen werden. Für die Erstellung dieser Modelle gibt es zwei Ansätze, den datenbasierten und den wissensbasierten Ansatz [CHN⁺12].

Datenbasierte Modellierung

Mit Hilfe von maschinellem Lernen⁴ und Data-Mining⁵ wird aus bereits existierenden Datensätzen ein abstraktes Modell zur Erkennung der Bewegung erlernt. Datenbasierte Modelle haben die Fähigkeit, mit Unsicherheiten und zeitlichen Informationen umzugehen. Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit, also die Möglichkeit gelernte Aktivitätsmodelle zu übertragen, sind hingegen schwierig umzusetzen. Des Weiteren werden zum Erstellen und Trainieren des Modells große Datensätze benötigt [CHN⁺12].

Wissensbasierte Modellierung

Bei der wissensbasierten Modellierung werden Modelle auf Basis von Fachwissen über die gewünschte Aktivität erstellt. Teil dieses Prozesses sind Wissenserfassung, formale Modellierung und Repräsentation. Wissen wird auf Grundlage von Quellen gesammelt. Diese werden dann für die Erstellung des Modells genutzt, welches den Bewegungsablauf repräsentieren soll. Wissensbasierte Modelle benötigen keinen großen Datensatz, sind semantisch klar und einfach zu handhaben. Des Weiteren sind die dabei erstellten Modelle allgemeingültiger und somit sowohl skalierbar als auch übertragbar. Sie sind dafür jedoch schlechter im Umgang mit eventuell auftretenden Unsicherheiten.

⁴ <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/machine-learning-120982> – zuletzt aufgerufen am 19.12.2020

⁵ <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/data-mining-28709> – zuletzt aufgerufen am 19.12.2020



3 Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt bereits vorhandene Lösungsansätze zur Wurfanalyse im Speerwurf vor. Ebenso werden verwandte Probleme vorgestellt, die mit Hilfe von IMUs gelöst wurden.

3.1 Wurfanalysetools im Speerwurf

Wie heutzutage in den meisten Anwendungen von automatisierter Bewegungserkennung im Sport basiert auch die Analyse von Speerwürfen vor allem auf optischen Systemen [NBN⁺19]. Es kommen, wie auch in anderen Bereichen der Bewegungserkennung [NBN⁺19], hauptsächlich visuelle Tracking-Systeme und optoelektronische Messsysteme zum Einsatz. Da diese Methoden nur unter bestimmten Laborbedingungen durchgeführt werden können, finden sie im realistischen Fall von Training und Wettkampf nahezu keine Verwendung. Die Verarbeitung der Daten erfordert zudem meist Experten und das Feedback nimmt Zeit in Anspruch. Üblicherweise beruht die Rückmeldung des Trainers meist auf subjektiven Vermutungen basierend auf Erfahrung. Aufgrund der hohen Komplexität und Geschwindigkeit der Bewegungsabläufe ist das Erkennen der wichtigsten Parameter alleine durch den Trainer nicht immer exakt möglich [WLW⁺18]. Um die Zuverlässigkeit der Rückmeldung zu verbessern, wird in manchen Fällen die Wurfbewegung durch den Trainer auf Video, mit Hilfe eines Smartphones oder Tablets und dafür entwickelten Apps (zum Beispiel *Technique*¹ oder *Coach's Eye*²) festgehalten (siehe Abbildung 3.1). Auf deren Grundlage wird die Bewegung durch den Trainer im Detail analysiert, wodurch die Geschwindigkeit der Bewegung kein allzu großes Problem in der Analyse mehr darstellt.

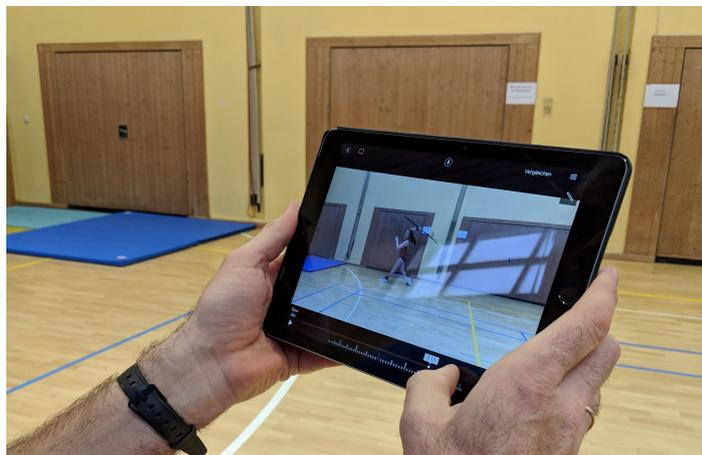


Abbildung 3.1: Aufnehmen und Analysieren des Bewegungsablaufs durch den Trainer mit Hilfe der App *Technique*

Auch wenn dadurch die Möglichkeit entsteht, Bewegungsabläufe bewusster wahrnehmen zu können und Hilfslinien sowie andere Orientierungspunkte einzuzichnen, so greift der Trainer trotz allem primär noch immer auf Erfahrungen basierend auf seinem subjektiven Eindruck zurück. Des Weiteren können wichtige Körperteile verdeckt und deshalb schwer zu analysieren sein. Eine computergestützte Analyse findet im Trainings- und Wettkampfbetrieb zum jetzigen Stand aus den oben genannten Gründen kaum Anwendung.

Das 1989 von [HA89] entwickelte System zur automatisierten Messung der Abwurfbedingungen besteht aus drei Subsystemen. Das Erste erfasst die Positionsdaten im zweidimensionalen Raum auf Basis eines

¹ <https://www.hudl.com/products/technique> – zuletzt aufgerufen am 6.1.2021

² <https://www.coachseye.com/> – zuletzt aufgerufen am 6.1.2021

Videos. Auf Grundlage dieser Positionsdaten werden die relevanten Abwurfbedingungen des Speers geschätzt. Im Anschluss werden diese Abwurfbedingungen grafisch dargestellt sowie der Flug für den Fall optimaler Bedingungen simuliert. Die Simulation des Wurfs beruht auf der in [HR84, Hub84] entwickelten Computersimulation der Differentialgleichung zur Beschreibung der Dynamik während des Flugs. Laut [HA89] war dies die erste Methode, die sofort die entscheidenden Faktoren eines Wurfs auf präzise und quantitative Weise kritisieren konnte.

Die Nutzung physiologischer Parameter wie Blutdruck und Herzfrequenz zu Trainingszwecken ist in [ER20] beschrieben. Physiologische Parameter können auf Stress und andere sich negativ auswirkende Parameter hindeuten. Dabei haben Blutdruck und Herzfrequenz die größte Aussagekraft und wurden aus diesem Grund in [ER20] genauer betrachtet. Die aufgezeichneten physiologischen Parameter werden in einer Datenbank gespeichert und sollen dem Sportler Feedback geben können. Da sich Vitalwerte nicht schlagartig nach Beenden der Aktivität ändern, ist eine Analyse, die nur auf Grundlage dieser Werte basiert, schwierig und eignet sich bestenfalls unterstützend zu einem IMU- oder kamerabasierten System [LPLP12].

[SNSK16] entwickelte einen IMU-basierten Ansatz zur Messung von Abwurfgeschwindigkeit, Abwurfwinkel und Flugbahn, genauer der Position und Geschwindigkeit des Speers. Dabei sollte die Mechanik des Speerwurfs – vor allem die Flugbahn – untersucht werden. Dazu war das Ziel, die Trajektorie des Speers in der Beschleunigungsphase sowie dessen Abweichungen von einer geradlinigen Bahn zu demonstrieren, momentan wirkende Kräfte darzustellen und die Wirkung aerodynamischer Kräfte auf den Speer während des Fluges angeben zu können. Zu diesem Zweck wurde eine IMU, bestehend aus Gyroskop und Beschleunigungssensor, in die Spitze eines Speers integriert. Aus den damit gemessenen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten des Speers lies sich die zeitparametrisierte Flugbahn der Speerspitze bestimmen, wodurch es möglich war, die Gesamtbewegung des Speers herzuleiten. Die geschätzten Flugbahnen wurden mit den tatsächlichen – die mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras ermittelt wurden – verglichen. Durch die Analyse von Beschleunigung, Beschleunigungsweg, Länge der Beschleunigung und Wirkung von externen Einflüssen auf das Flugverhalten des Speers liefert diese Arbeit ein besseres Verständnis über die Grenzen menschlicher Leistungen im Speerwurf [SNSK16]. Lage, Position und Geschwindigkeit des Speers vom Anlauf bis zur Landung wurden hierzu bestimmt. Eine Analyse der Technik des Bewegungsablaufs des Werfenden im Speerwurf mit Hilfe von IMUs ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt [NBN⁺19, CBFV18].

3.2 IMUs in der Wurfanalyse

Bei der Nutzung tragbarer Sensoren zur Analyse von Würfen anderer Sportarten sind Ansätze mit IMUs am verbreitetsten [NBN⁺19]. Aufgrund ihres kleinen, leichten und kaum wahrnehmbaren Charakters sowie der Möglichkeit, essentielle Charakteristiken zur Beurteilung sportlicher Leistungen zu erhalten, eignen sie sich sehr gut für diese Aufgabe. Vor allem für die Anwendung in Gebieten, die aufgrund von Einschränkungen anderer Systeme – wie zum Beispiel durch unpassende Lichtverhältnisse oder flexible Anwendungsbereiche – nicht möglich sind, sind IMUs gut geeignet. Solch ein Szenario kann zum Beispiel im Wettkampf oder im realistischen Trainingsbetrieb vorkommen.

Würfe bestehen aus zwei wesentlichen Teilen: zum einen der Kraft des Werfers und der daraus resultierenden Abwurfgeschwindigkeit, zum anderen der Wurftechnik, die einen nicht unwesentlichen Anteil an der Leistung des Werfers hat [NBN⁺19]. Im Folgenden wird die Anwendung von IMUs in Studien zur Analyse von Technik sowie zur Messung von Abwurfgeschwindigkeiten und Zeitpunkten diverser Wurfdisziplinen vorgestellt.

3.2.1 Analyse der Wurftechnik

[KSK⁺10] entwickelte eine Methode zur Schätzung der dreidimensionalen Trajektorien des Arms sowie dessen Orientierung während der Pitching-Bewegung (siehe Abbildung 3.2) im Baseball. Dazu wurden

zwei Sensoren – bestehend aus Beschleunigungssensor und Gyroskop – an Ober- und Unterarm der Sportler befestigt (siehe Abbildung 3.3).

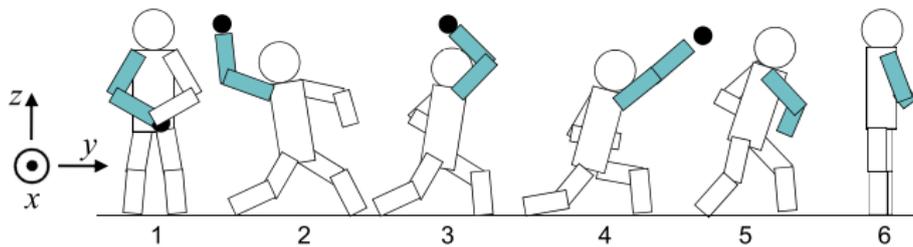


Abbildung 3.2: Die in [KSK⁺10] untersuchte Pitching-Bewegung

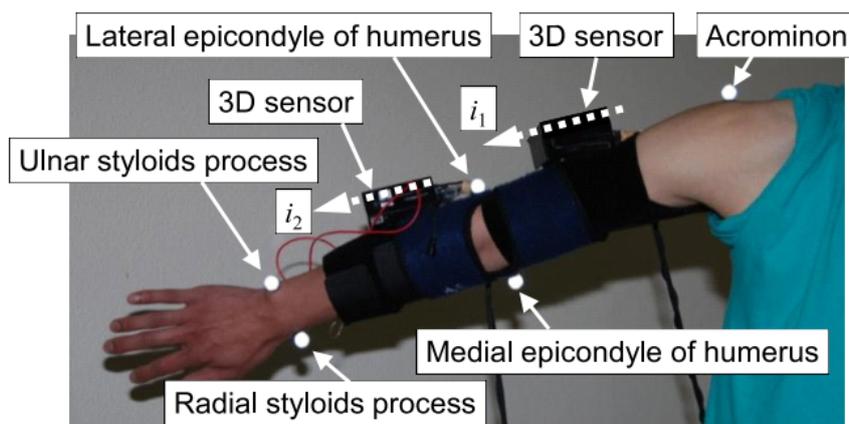


Abbildung 3.3: Positionierung der Sensoren in [KSK⁺10]

Vor der Nutzung muss das System mit Hilfe vorgeschriebener Bewegungen kalibriert werden, um die Beziehungen der Sensoren zueinander zu bestimmen. Experimentelle Vergleiche mit einer herkömmlich verwendeten videobasierten Analyse zeigten dabei, dass das System in der Lage war, Trajektorie und Orientierung des Wurfarms ausreichend genau zu bestimmen. Dieses System kann somit ohne aufwändige Installation und unabhängig vom Messort eingesetzt werden.

Ein ähnliches Fazit zog [BMC⁺19] bei der Nutzung der *motusBASEBALL*³ IMU, welche aus einem triaxialen Beschleunigungssensor und einem triaxialen Gyroskop besteht. Diese wurde wie vom Hersteller vorgesehen am Ellbogen der Sportler befestigt (siehe Abbildung 3.4). [BMC⁺19] vergleicht die dabei erzielten Ergebnisse mit denen einer marker-basierten Bewegungsanalyse eines optoelektronischen Messsystems (siehe Kapitel 2.2.1). Der Vergleich der beiden Methoden zeigt dabei, dass die Nutzung der IMU eine kostengünstige Alternative zur Erfassung von Armeinsatz, Schulterrotation und Belastungsmetriken ist.

In der Wurfanalyse der leichtathletischen Disziplinen finden IMUs zur Zeit keine große Anwendung [NBN⁺19]. In bisherigen Studien wurden sie im Bereich des Diskuswurfs zur Messung relevanter Daten des Schulter-Becken-Trennungswinkels und der Rumpf-Becken-Orientierung verwendet [BHP18]. Im Hammerwurf entwickelte [WLW⁺18] ein System zur Erkennung typischer Bewegungsmuster. Die dazu verwendeten IMUs bestanden aus jeweils einem triaxialen Beschleunigungssensor, Gyroskop und Magnetometer. Die IMUs wurden an Hüfte und Handgelenk getragen, sodass eine uneingeschränkte Bewegung möglich war. Die dadurch geschätzten Positionsdaten von Hüfte und Handgelenk erwiesen sich mit einem durchschnittlichen Fehler von unter sechs Prozent als genau genug für die Sportanalyse.

³ <https://www.motusglobal.com/motusbaseball> – zuletzt aufgerufen am 19.12.2020



Abbildung 3.4: Befestigung der *motusBASEBALL* IMU (blau) am Wurfarm in [BMC⁺19]

Durch Auswertung der gesammelten Daten lassen sich typische Bewegungsmuster im Hammerwurf (dynamisch vertikale Abstände von Hüfte und Handgelenken) und weitere typische Bewegungsmuster wie die vertikale Hüftverschiebung bestimmen. [WLS18] baut auf dem in [WLW⁺18] entwickelten System auf. Diese Daten können zur Verbesserung der Fertigkeiten und zum Herausarbeiten der Koordination der oberen und unteren Gliedmaßen verwendet werden. Die dabei entstandenen Ansätze könnten nach [WLW⁺18] Grundlage für ein trainerfreundliches Werkzeug für effektives Training und effektive Lehre sein und den Vorteil haben, dass Auswertung und Analyse nahezu in Echtzeit stattfinden. Das Tool hätte außerdem den Vorteil, die wissenschaftliche Bewegungsanalyse aus dem Labor in die Praxis zu bringen und durch die einfache Anwendbarkeit eine breitere Masse von Nutzern ansprechen zu können.

Im Kugelstoßen wurde ein Beschleunigungssensor-basiertes System zur Bestimmung wichtiger kinematischer Variablen bei der Rotationstechnik verwendet [SAŠČ18].

3.2.2 Messen des Abwurfs

Die zur Analyse des Abwurfs unabhängig von Anlaufbewegungen verwendeten Methoden werden im Folgenden erläutert:

Im Bereich des Handballs wurde die Verwendung von IMUs zur Messung von Abwurfzeitpunkt und Wurfgeschwindigkeiten untersucht, um die bisherige teure kamerabasierte Methode, die durch die Gegebenheiten ein multi-cam setup benötigt, zu ersetzen [GG20, SBMS20]. Ziel der Arbeiten war es, die Abwurfgeschwindigkeit im Zusammenhang mit Schulterverletzungen zu betrachten. Es wurde eine IMU mit einem triaxialen Beschleunigungssensor am Handgelenk des Wurfarms angebracht und es wurde sich auf Überkopf-Würfe aus dem Stand ohne Anlauf fokussiert. Der ermittelte Wert wurde mit der Geschwindigkeitsmessung einer Radarpistole verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass eine Abtastrate von 500Hz, wie in [GG20] verwendet, einen exakteren Wert als eine Abtastrate von 250Hz aus [SBMS20] erzielte. Dies lies sich auf die hohen Abwurfgeschwindigkeiten im Handball – die zwischen 60 und 84 km/h betragen können – zurückführen [GG20]. Der absolute Fehler bei einer Abtastrate von 500Hz war gering. Das Modell zur Erkennung der Abwurfgeschwindigkeit wurde bei [GG20] mit Hilfe von maschinellem Lernen erstellt.

Im Baseball wurde zur Bestimmung von Abwurfzeitpunkt sowie Abwurf- und Winkelgeschwindigkeit eine IMU in den Ball integriert [MP12]. Diese Methode erwies sich als hinreichend genaue Bestimmung der Abwurfgeschwindigkeit.

Im Falle des Kugelstoßens wurden triaxiale Beschleunigungssensoren in der Kugel verbaut [GZ14, GSL⁺06, GSX⁺07]. Die daraus gewonnen Erkenntnisse der Beschleunigung der Kugel wurden in [GSL⁺06, GSX⁺07] zusammen mit Analysen des Bewegungsablaufs des Sportlers durch andere Me-

thoden, wie Kameras und Kraftmessplatten, zur Analyse und Erkennung der Wurfbewegung genutzt. [GZ14] nutzte nur die Beschleunigungsdaten zur Analyse wichtiger Parameter im Kugelstoßen.

3.3 Zusammenfassung

Der Einsatz der bisher entwickelten Systeme zur Erkennung und Analyse der Technik des Werfers im Speerwurf erfolgt zur Zeit nur in einer Laborumgebung. Aufgrund der hohen Kosten der Infrastruktur und des Aufbaus dieser Analysen ist deren Verwendung im Trainings- und Wettkampfalltag nicht üblich. Hinzu kommen die zu erfüllenden Bedingungen, die den Einsatz dieser Systeme erst möglich machen. So muss sich der Sportler in einem gewissen Bereich aufhalten und Umgebungsparameter wie Licht, Kameraausrichtung und Sichtfeld müssen den Anforderungen entsprechen. Außerdem ist der Rechenaufwand für derlei Methoden im Trainings- oder Wettkampfall zu hoch und eine Bedienung nicht immer intuitiv möglich, sodass Feedback während des Wettkampfes durch solch ein System schwierig umzusetzen ist.

Die im Trainingsalltag üblichere Methode der Videoanalyse durch den Trainer ist hingegen einfacher durchzuführen. Allerdings geschieht die Einschätzung in diesem Falle nur auf der subjektiven Meinung des Trainers, basierend auf seinen Erfahrungen und dem von ihm zuvor wahrgenommenen Bewegungsablauf.

Zur Erkennung von Bewegungen unabhängig vom Ort der Ausführung eignen sich IMUs. Sie sind nicht nur kostengünstig, sondern auch leicht am Körper zu tragen, ohne dass sie stören. Außerdem haben sie einen geringen Energieverbrauch und die Verarbeitung der gesammelten Daten ist weniger zeitaufwendig, weshalb ein (nahezu) Echtzeit-Analyse-System mit ihnen umzusetzen ist [WLW⁺18]. Bisherige Arbeiten in Wurfsporarten mit IMUs bei Überkopfwürfen, die verwandt sind mit dem Speerwurf, beziehen sich zurzeit größtenteils nur auf die technische Bewegung des Wurfarms [KSK⁺10, BMC⁺19], auf die Abwurfgeschwindigkeit oder den Abwurfwinkel [MP12, GG20, SBMS20]. Wurfbewegungen anderer Formen wurden in einigen Fällen nicht nur auf Abwurfgeschwindigkeit und Winkel [GZ14, GSL⁺06, GSX⁺07], sondern auch auf wichtige Parameter des Bewegungsablaufs – mit Hilfe von am Körper befestigten Sensoren – analysiert [WLW⁺18, WLS18]. [SNSK16] analysierte das Verhalten des Speeres während der Abwurf- und Flugphase durch eine im Speer eingebaute IMU. Rückschlüsse auf die genaue Bewegung des Athleten ließ dies allerdings nicht zu. Parameter, die durch am Körper getragene IMUs ermittelt werden, kamen zur Analyse des Bewegungsablaufs der Wurftechnik im Speerwurf bisher noch nicht zum Einsatz [NBN⁺19].

Dabei hat dieses System die Chance, durch die oben beschriebenen Vorteile von IMUs eine gute Ergänzung für Trainer und Sportler im Trainings- und Wettkampfalltag darzustellen. Diese Arbeit soll den Grundstein legen für ein solches System, welches die Bewegungsanalyse des Sportlers unterstützt.



4 Konzept

Das folgende Kapitel beschreibt Herangehensweise, Konzept und Entwicklung des sensorbasierten Systems zur Erkennung und Analyse von Speerwürfen. Dabei werden zuerst die vom System zu analysierenden Parameter festgelegt. Die wichtigsten und für den Trainer am schwierigsten zu beobachtenden Parameter einer Wurfbewegung werden dazu besprochen und ein allgemeingültiges Modell des idealen Bewegungsablaufs wird erstellt, auf dessen Grundlage das System den Bewegungsablauf bewerten soll. Anschließend werden aufgetretene Herausforderungen beschrieben. Das Vorgehen zum Entwickeln der Anbringung der Sensoren am Körper ist im Anschluss Thema. Die Entstehung der finalen Sensorpositionen und getroffene Entscheidungen werden in diesem Zusammenhang erläutert. Abschließend wird die Entwicklung des Bewertungssystems besprochen. Dabei werden die betrachteten Sensorparameter sowie die Entscheidung diese zu verwenden begründet. Des Weiteren wird das Vorgehen des Systems zur Erkennung der wichtigen Zeitpunkte und die Form der Rückmeldung beschrieben.

4.1 Gütekriterien der Speerwurfbewegung

Ausgehend von dem in Kapitel 2 erwähnten Technikleitbild, gilt es als Erstes, wichtige zu analysierende Aspekte und Phasen der Wurfbewegung herauszuarbeiten. Auf Grundlage dieser wichtigen zu prüfenden Parameter können anschließend die Befestigung der Sensoren am Körper sowie die Funktionalitäten des Systems diskutiert werden.

4.1.1 Phasen der Bewegung

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, gilt vor allem die technische Ausführung des Bewegungsablaufs als leistungsbestimmende Einflussgröße der Abfluggeschwindigkeit. Die Abwurfvorbereitung und die Abwurfbewegung sind dabei besonders relevant [KRS⁺11]. Aus diesem Grund wird sich die Analyse durch das System vor allem auf diesen Zeitabschnitt beziehen. Wichtige Komponenten in diesem Zeitraum sind Oberkörperrücklage, Hüfteinsatz und Abknicken des Rumpfs sowie Abwurfwinkel, Anstellwinkel und Verkantungswinkel (siehe Kapitel 2). Außerdem ist die korrekte Abfolge der Bewegungsabschnitte von großer Relevanz. Das heißt, dass die in den Abbildungen 2.7 und 2.9 dargestellte Bewegungsreihenfolge – Setzen des drittletzten Schritts vor dem Abwurf, Impulsschritt, Hüfteinsatz, Stemmschritt, Beginn der Abwurfbewegung und Abwurf des Speers – einzuhalten ist.

Die genannten Zeitpunkte stellen die wichtigsten Zeitpunkte in den Phasen der Abwurfvorbereitung und der Abwurfbewegung dar. Abwurf-, Anstell- und Verkantungswinkel hängen nicht direkt mit dem technischen Bewegungsablauf des Sportlers zusammen. Sie sind vor allem von Bewegung und Stellung der Hand abhängig. Ein System zum Bestimmen dieser Parameter wurde in [SNSK16] behandelt, welches sich primär auf die Bewegung des Speers und weniger auf die des Athleten bezieht. Des Weiteren sind – wie in Kapitel 2 erwähnt – diese Parameter stark von den herrschenden Windverhältnissen abhängig und aus diesem Grund nicht allgemeingültig. Deshalb werden sie hier nicht weiter betrachtet.

Um aus den verbleibenden Parametern die zu analysierenden herauszuarbeiten, wurden die im Trainingssalltag schwer zu identifizierenden Parameter zusammen mit Speerwurf-Trainern, unter anderem dem hessischen Landeskadertrainer im Speerwurf, erarbeitet. Dabei erwiesen sich sowohl die Oberkörperrücklage als auch das Abknicken des Rumpfes als einfache, leicht durch Trainer identifizierbare Bewegungen. Auch grobe technische Fehler, die vor allem von Anfängern gemacht werden, wie zum Beispiel das falsche Halten des Speers oder Fehler in der Anlaufbewegung sind leicht von Trainern zu erkennen und aus diesem Grund nicht Gegenstand des Assistenzsystems. Als schwieriger – ohne Hilfsmittel durch Trainer identifizierbare Parameter der Bewegung – erwiesen sich die exakte zeitliche Abfolge der zuvor

genannten Zeitpunkte, vor allem der Zeitpunkt des Hüfteinsatzes. Dies ist auf den schnellen Ablauf der Bewegung, sowie die dezente und somit schwierig zu erkennende Bewegung in der Hüfte zurückzuführen. Deshalb soll Ziel des Systems sein, den Bewegungsablauf auf Korrektheit zu prüfen. Das heißt, dass der Hüfteinsatz zwischen Stemmschritt und Impulsschritt stattfinden und die aktive Abwurfbewegung der Hand erst nach dem Setzen des Stemmschritts beginnen soll. Außerdem soll das zeitliche Verhältnis von Impuls- und Stemmschritt zueinander ermittelt werden, um es – wie in Kapitel 2 erwähnt – auf ein Verhältnis von drei zu zwei überprüfen zu können. Die zu ermittelnden Teilbewegungen im Bewegungsablauf sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

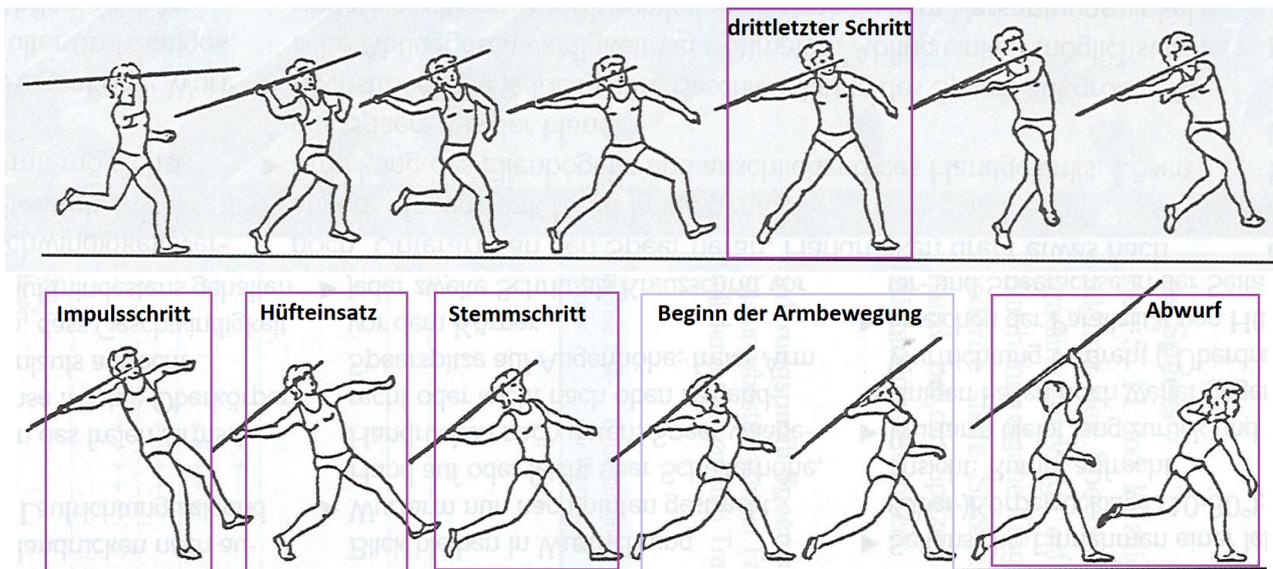


Abbildung 4.1: Betrachtete Zeitpunkte im in Abbildung 2.9 gezeigten Ablauf des Speerwurfs [SJS13]

4.1.2 Herausforderungen

Obwohl die dem Ablauf zugrunde liegenden Bewegungsabschnitte der Wurfbewegung im Speerwurf allgemeingültig sind, so unterscheiden sich die Bewegungen vor allem in ihren unterschiedlichen Zeitpunkten und Geschwindigkeiten. Dies kann vom Leistungsniveau des Werfers, dem Gewicht des genutzten Speers und den Umständen des Trainings oder Wettkampfs abhängen. Auch unterschiedliche Startzeitpunkte der Aufnahme spielen eine große Rolle. Aufgrund dieser Nicht-Skalierbarkeit des Modells ist es nicht möglich, ein allgemeingültiges Modell zu erstellen, mit dem die ausgeführte Bewegung abzugleichen ist. Um diese Herausforderung zu umgehen, sollen die Zeitpunkte des Bewegungsablaufs relativ zueinander betrachtet werden.

4.2 Entwicklung des Systems

Mithilfe der zuvor festgelegten Zeitpunkte des Wurfablaufs gilt es nun, diese durch Sensordaten zu identifizieren. Dazu werden die in Kapitel 2 vorgestellten IMUs (siehe Abbildung 2.12) aufgrund ihrer zuvor genannten Vorteile verwendet. Besonders wichtig ist es dabei, dass alle für die Bewertung relevanten Daten durch die IMUs erfasst werden können. Die damit einhergehende Frage der Befestigung der IMUs an entscheidenden Stellen und das Vorgehen zum Erarbeiten dieser wird nachfolgend beschrieben. Im Anschluss wird die Entwicklung des Analysesystems, welches die gemessenen Daten verarbeitet und analysieren soll, beschrieben.

4.2.1 Befestigen der Sensoren

Um die bestmögliche Anbringung der Sensoren am Körper zu erarbeiten, wurden zu Beginn zwei verschiedene Varianten (im Folgenden Konfiguration A und Konfiguration B) getestet. Die IMUs wurden dazu jeweils in einem Schweißband in der in Abbildung 2.12 abgebildeten Richtung eingelegt und am Körper der Werfenden angebracht. Die Koordinatenachsen der IMU sind in Abbildung 4.13 zu sehen. Da der Bewegungsablauf der Sportler im Vordergrund steht, wird ausschließlich die Anbringung der Sensoren am Körper der Werfenden in Betracht gezogen. Anbringungen an Wurfgeräten wie in [SNSK16, MP12, GZ14, GSL⁺06, GSX⁺07] geben keine ausreichende Aussage über die Bewegung des Sportlers und sind aus diesem Grund nicht zielführend.

Bei *Konfiguration A* werden IMUs an allen vier Gliedmaßen befestigt. An den Armen werden sie an den Handgelenken und an den Beinen an den Sprunggelenken befestigt (siehe Abbildung 4.2). Ziel dabei ist es, generelle Bewegungen der Gliedmaßen zu beobachten und somit die Wichtigkeit dieser für das Ermitteln des Bewegungsablaufs zu bestimmen. *Konfiguration B* wurde in Rücksprache mit Leichtathletiktrainern entwickelt. Die Orte der Befestigung wurden anhand der in der Theorie wichtigsten Körperteile bestimmt. Die IMUs sind an Handgelenk und Oberarm des Wurfarms, sowie am Sprunggelenk des Stemmbeins und vor dem Hüftknochen der Seite der Wurfhand angebracht (siehe Abbildung 4.3). Die Positionierung eines Sensors am Handgelenk wurde gewählt, um den Zeitpunkt des Abwurfs ermitteln zu können. Der Sensor am Oberarm soll den Beginn der Armbewegung ermitteln. Durch das Anbringen einer IMU am Sprunggelenk des Stemmbeins soll der Zeitpunkt des Setzens des Stemmbeins bestimmt werden und durch das Anbringen eines Sensors an der Hüfte soll der Zeitpunkt des Hüfteinsatzes ermittelt werden. Die Anbringung der Sensoren wird außerdem durch Erkenntnisse aus den in Kapitel 3 erwähnten Arbeiten unterstützt. Die Positionierung an Handgelenk und Oberarm wurde ebenfalls von [KSK⁺10] gewählt (siehe Abbildung 3.3), um die Trajektorie des Arms nachzuvollziehen. Die Positionierung der IMU am Handgelenk wurde zudem im Zusammenhang mit Abwurfbewegungen in [GG20, SBMS20] verwendet. Das Anbringen einer IMU an der Hüfte und einer am Handgelenk des Wurfarms wurde in [WLW⁺18] verwendet, um typische Bewegungsmuster der beiden Körperteile zu analysieren.



Abbildung 4.2: Konfiguration A



Abbildung 4.3: Konfiguration B

Für beide Konfigurationen wurden Bewegungsabläufe von jeweils zwei Speerwerferinnen aufgenommen. Diese hatten verschiedene Leistungsklassen: eine Kaderathletin sowie eine Athletin, die die Feinform der Wurfbewegung beherrscht. Beide Athletinnen waren dabei Rechtshänder, weshalb die Bewegungsabläufe den in Kapitel 2 beschriebenen entsprechen. Aufgrund der schnellen Bewegungsabfolge und der unter anderem in [GG20, SBMS20] empfohlenen Abtastrate von 250 beziehungsweise 500Hz wurde die Abtastrate von 416Hz für die Aufnahmen gewählt (siehe [Dor19]). Zusätzlich zu den Aufnahmen der IMU-Daten wurde Videomaterial zum Ablauf der Würfe mithilfe der in Kapitel 3 erwähnten App *Technique* aufgenommen (siehe Abbildung 3.1). Dieses wurde zur Ersteinschätzung durch den Trainer vor Ort sowie zur anschließenden Analyse der Daten als Vergleich zu den vom Sensor aufgezeichneten Daten genutzt. Bei beiden Konfigurationen wurden zu allen Würfen die Daten der Beschleunigungen, Winkelgeschwindigkeiten und Winkel mit dem im Video zu sehenden Bewegungsablauf abgeglichen sowie manuell auf Auffälligkeiten untersucht.

Konfiguration A

Die Auswertung der Beschleunigungsdaten aller Aufnahmen ließ eine eindeutige Identifizierung der Zeitpunkte der Wurfhand, des Stemmbeins und des Druckbeins zu (siehe Abbildung 4.4). Der Zeitpunkt des Abwurfs ließ sich dabei leicht durch einen einzigen starken Peak in der gesamten Aufnahme der rechten Hand (*RH*) identifizieren. Der letzte und größte Peak des linken Beins (*LF*) vor dem Zeitpunkt des Abwurfs lässt sich einfach als Stemmschritt identifizieren. Der Impulsschritt kann eindeutig als letzter und größter Ausschlag des rechten Beins (*RF*) vor der Abwurfbewegung identifiziert werden. Die in der Abbildung markierten Positionen stellen die identifizierten und mit den Videodaten der Aufnahme abgeglichenen Zeitpunkte dar. Die Beschleunigungsdaten des linken Handgelenks (*LH*) liefern hingegen keine verwertbaren aussagekräftigen Daten. Dies ist vor allem auf das nicht aktive Beteiligen an der Wurfbewegung und das Mitschwingen beim Anlauf zurückzuführen.

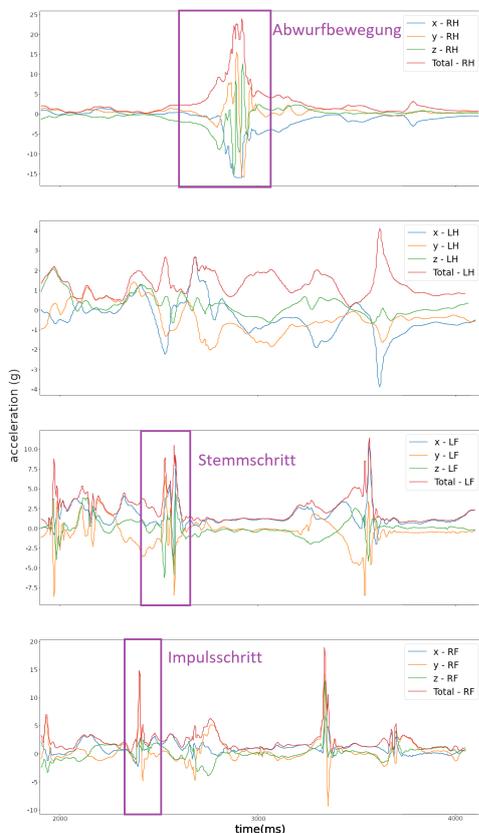


Abbildung 4.4: Beschleunigungsdaten Konfig. A

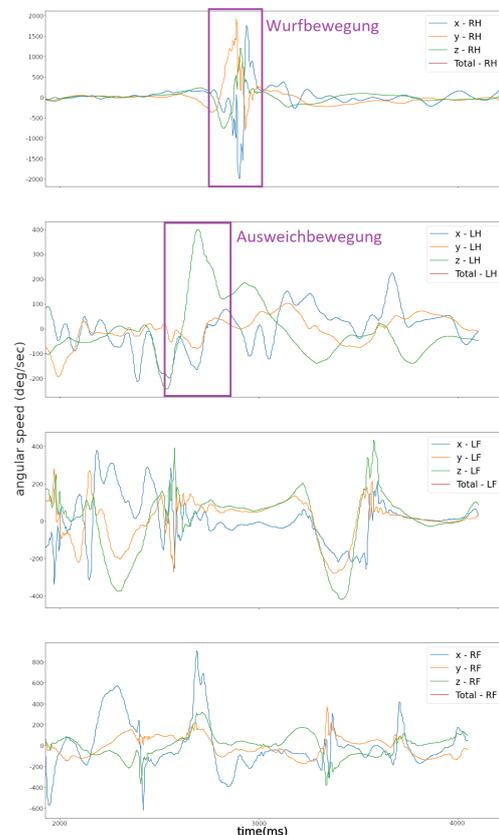


Abbildung 4.5: Winkelgeschwindigkeiten Konfig. A

Die Winkelgeschwindigkeiten sowie die gemessenen Drehwinkel an den jeweiligen Stellen weisen nur bei Sensoren, die an den Händen befestigt sind, klare Ausschläge auf (siehe Abbildung 4.5). Der Sensor der rechten Hand weist einen Peak zum Zeitpunkt der Wurfbewegung auf. Die linke Hand weist einen Peak kurz vor der Ausführung der Wurfbewegung auf. Dies liegt daran, dass eine Drehung des Handgelenks der Wurfhand Teil der Abwurfbewegung des Wurfarms ist. Sobald die zurückgehaltene Hand nach vorne beschleunigt wird, dreht diese sich auf dem Weg zum Punkt des Abwurfs um alle drei Achsen der IMU, vor allem um die x- und y-Achsen (siehe Abbildung 4.15). Während der Abwurfbewegung bewegt sich außerdem der linke Arm von einer Position vor dem Körper zu einer seitlichen Lage. Dies ist durch eine Drehung um die y-Achse zu erkennen. Während des Stemmschritts und Impulsschritts existieren hingegen keine signifikanten oder einheitlichen Drehungen um eine der Achsen, weshalb eine Erkennung dieser Punkte auf den Daten des Gyroskops nicht zielführend ist.

Konfiguration B

Wie schon in Konfiguration A lassen sich Stemmschritt und Abwurfzeitpunkt anhand der jeweiligen Beschleunigungsdaten und der Abwurfzeitpunkt zusätzlich anhand der Gyroskopdaten identifizieren. Die Bewegung des rechten Oberarms (RA) lässt sich ebenso wie der Abwurfzeitpunkt anhand einer starken Auslenkung der Beschleunigungen und der Winkelgeschwindigkeiten identifizieren. Die Bewegung der Hüfte (HIP) lässt sich anhand des maximalen negativen Ausschlags in z-Richtung der Beschleunigungsdaten (Abbildung 4.6) finden. Dabei stellt das letzte lokale Maximum der z-Achse vor dem globalen Minimum der z-Achse den Zeitpunkt des Starts des Hüfteinsatzes dar.

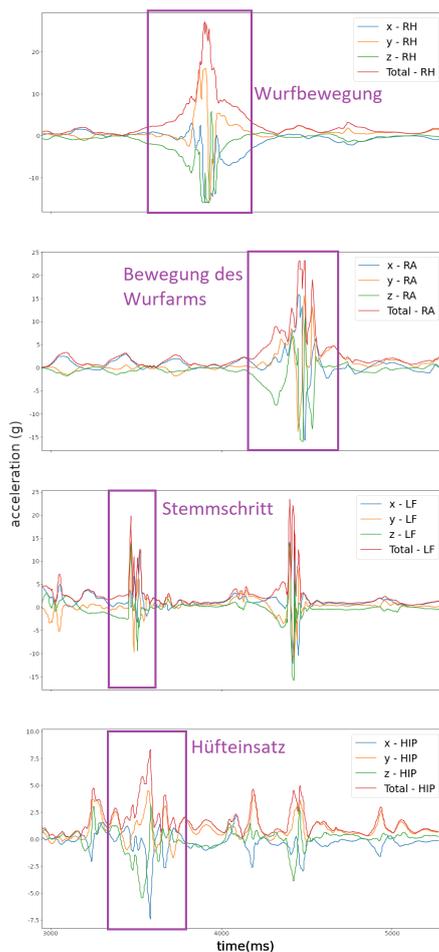


Abbildung 4.6: Beschleunigungsdaten Konfig. B

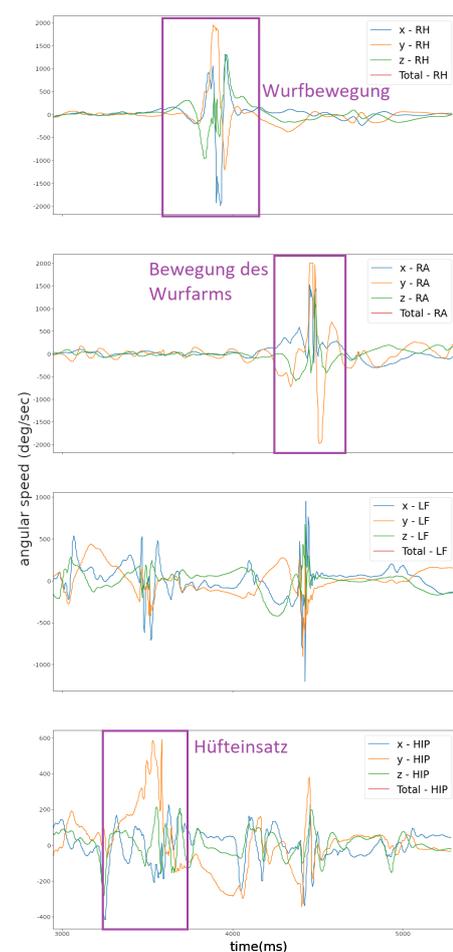


Abbildung 4.7: Winkelgeschwindigkeiten Konfig. B

Die Daten des Gyroskops (Abbildung 4.7) weisen um, die y-Achse der IMU – die Achse um welche die Hüfte gedreht wird – zum Zeitpunkt des Hüfteinsatzes einen Anstieg der Winkelgeschwindigkeit auf. Werden die aus dem Gyroskop errechneten Winkeldaten (Abbildung 4.8) betrachtet, so ist aus diesem Grund auch dort eine starke Veränderung des um die y-Achse gemessenen Winkels zu erkennen. Mit dessen Hilfe lässt sich der Zeitpunkt des Hüfteinsatzes ebenfalls ermitteln. Allerdings erweist sich die Erkennung anhand der Beschleunigungsdaten als genauer.

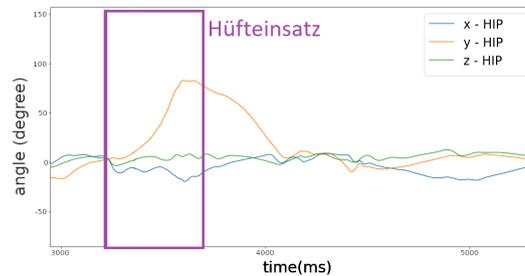
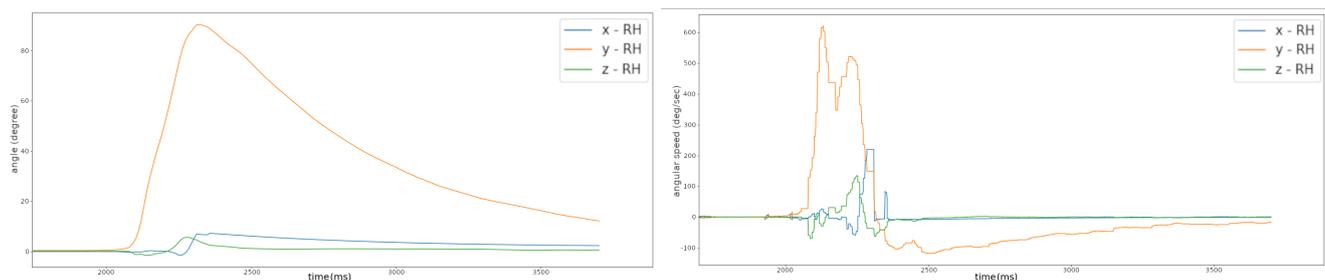


Abbildung 4.8: Winkel der Hüftbewegung in Konfig. B

Die Betrachtung des Hüftwinkels wird aus zwei Gründen verworfen: Zum einen existiert kein offizieller allgemeingültiger idealer Winkel der Hüftverwringung. Dieser Aspekt wird von verschiedenen Trainern unterschiedlich interpretiert und ausgelegt. Dies macht es schwierig, die Bewertung anhand ihrer Auslenkung allgemeingültig bestimmen zu können. Zum anderen weisen die errechneten Winkeldaten nach der Drehung um eine Achse eine Verringerung des Winkels auf, ohne dass eine Drehung stattgefunden hat. Um dies zu überprüfen, werden Testdaten aufgenommen, bei denen die Sensoren 90° um ihre y-Achse (siehe Abbildung 4.13) gedreht wurden. Wie in Abbildung 4.9a zu sehen, verringert sich der Winkel nach dem Beenden der Bewegung. Dies lässt sich dabei durch den Ladungsausgleich zwischen den Kondensatoren des Gyroskops (siehe [Dor19]) nach dem Beenden der Bewegung begründen. Aufgrund des Ladungsausgleichs misst das Gyroskop eine geringe negative Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse (siehe Abbildung 4.9b). Dieser Effekt verfälscht die Ergebnisse der Winkel, vor allem bei lang anhaltenden, langsamen Drehungen um eine Achse. Deshalb wird der Winkel des Hüfteinsatzes nicht betrachtet.



(a) Abfall des um die y-Achse gemessenen Winkels durch Ladungsausgleich **(b)** Auswirkungen des Ladungsausgleichs auf die gemessene Winkelgeschwindigkeit

Abbildung 4.9: Daten einer um 90° um die y-Achse gedrehten IMU

Nach Analyse beider Befestigungskonfigurationen sind folgende Zeitpunkte identifizierbar: Die Wurfbewegung, die Bewegung des Oberarms der Wurfhand, der Stemmschritt, der Impulsschritt, der Hüfteinsatz und die Ausweichbewegung der linken Hand vor dem Abwurf. Eine gesonderte Aufnahme der isolierten Bewegung an Hand und Oberarm, also der reinen Abwurfbewegung des Sportlers ohne Anlauf, deutet darauf hin, dass die Daten der Armbewegung keinen großen Mehrwert zu den Daten, welche am

Handgelenk aufgenommen werden, liefern (siehe Abbildung 4.10).

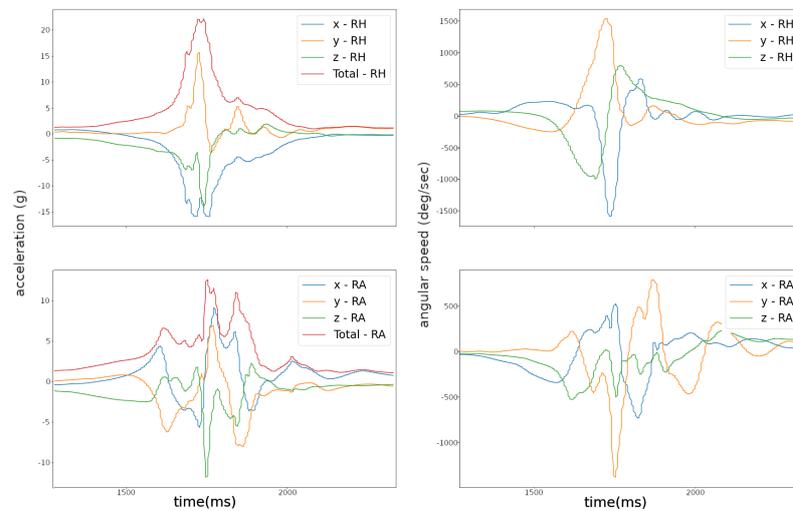


Abbildung 4.10: An Oberarm und Hand gemessene Daten, bei einer Abwurfbewegung ohne Anlauf

Aus diesem Grund ist das Anbringen der IMU am Oberarm des Wurfarms nicht nötig. Aus den übrigen Zeitpunkten ergeben sich die Befestigungen der Sensoren am Handgelenk des Wurfarms, beiden Fußgelenken und der Hüfte auf der Seite des Wurfarms als optimal. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Zeitpunkte des Wurfs, der Schritte und des Hüfteinsatzes identifizieren. Dies sind die Zeitpunkte, die zuvor als wichtig definiert wurden. Die Identifikation des Zeitpunkts der Ausweichbewegung der Hand, welche nicht die Wurfhand ist, ist selten Teil eines bewegungstechnischen Fehlers und in einem solchen Fall für Trainer auch ohne Hilfsmittel leicht zu identifizieren. Aus diesem Grund wird eine Befestigung an dieser Stelle verworfen.

Die resultierende und finale Anordnung der Sensoren ergibt sich aus den übrigen Anbringungsstellen. Diese sind das Handgelenk des Wurfarms, vor dem Hüftknochen der Seite des Wurfarms sowie an den Fußgelenken beider Füße (siehe Abbildung 4.11).

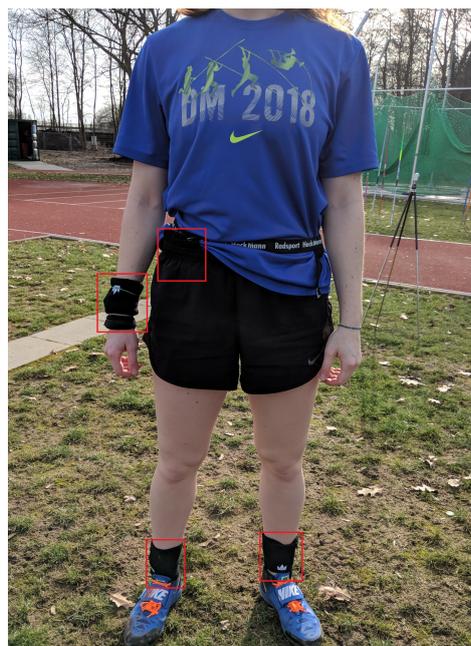


Abbildung 4.11: Finale Positionen der Sensoren

4.2.2 System

Um die Erkennung der wichtigen Zeitpunkte durch das System zu entwickeln, werden für die finale Anbringung der Sensoren (Abbildung 4.11) ebenfalls Beispieldaten gesammelt. Diese werden von einer Kaderathletin, einer Athletin, die die Feinform beherrscht und einem Anfänger erbracht. Abbildung 4.12 zeigt beispielhaft eine Aufnahme eines guten Wurfs durch die Kaderathletin, auf deren Grundlage die Entwicklung des Systems im Folgenden erläutert wird. Zusätzlich zur Aufnahme durch die Sensoren wird wie zuvor eine Videoaufnahme des Wurfs angefertigt, um die Genauigkeit des sich in der Entwicklung befindlichen Systems überprüfen zu können.

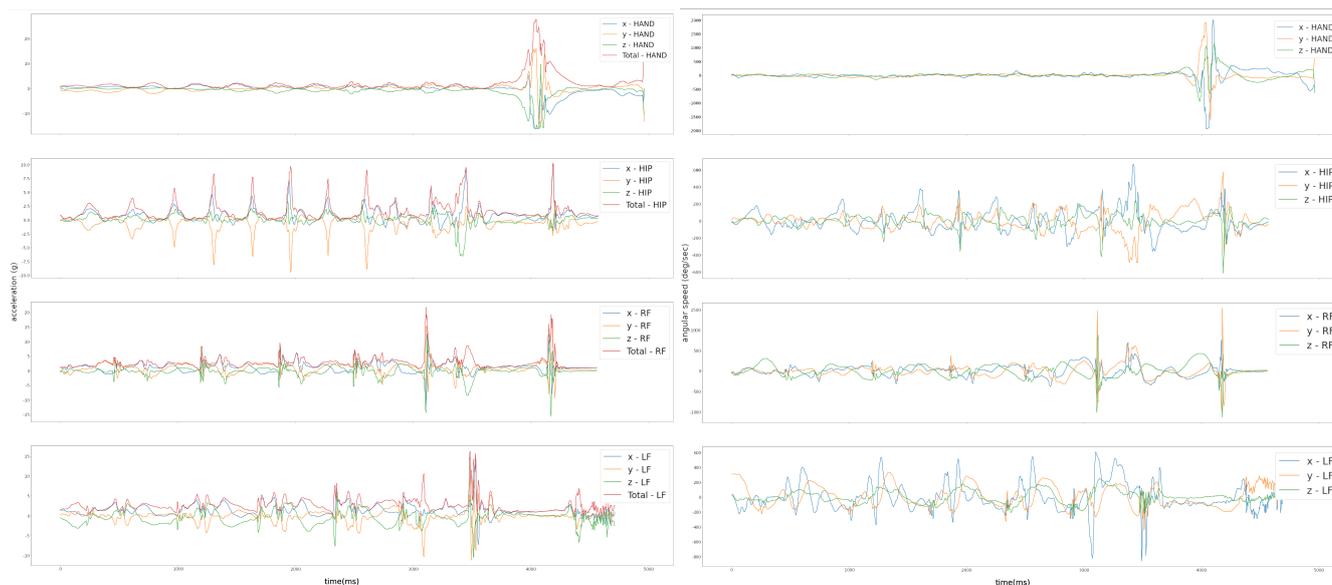


Abbildung 4.12: Beispielfähige Aufnahme der Wurfbewegung mit der finalen Anbringung der Sensoren

Um dem Problem nicht fester Zeitpunkte entgegenzuwirken, wird als fixer Orientierungspunkt in allen Würfen der Zeitpunkt des Abwurfs gewählt. Diese Wahl lässt sich dadurch begründen, dass der Moment der Abwurfbewegung – im Gegensatz zu anderen Bewegungen im Wurfablauf – eine einfache und klar zu identifizierende Bewegung ist (siehe Abbildungen 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 und 4.12). Außerhalb des Abwurfzeitpunkts wird die Hand wenig bis gar nicht bewegt, weshalb erst zum Zeitpunkt des Abwurfs eine Beschleunigung der Wurfhand wahrzunehmen ist.

Nachfolgend werden die zur Analyse betrachteten Parameter der Sensoren besprochen. Dazu werden außerdem die Zusammenhänge zueinander – ausgehend vom fixen Punkt der Abwurfbewegung – diskutiert und auf ihrer Grundlage die Erkennung der Zeitpunkte entwickelt. Anschließend wird die Auswertung der erkannten Zeitpunkte und die Rückmeldung an den Nutzer erläutert.

Erkennen der Zeitpunkte

Um die geeigneten Parameter und zu betrachtende Achsen zu wählen, werden zunächst die Koordinatenachsen der IMU ermittelt. Diese sind in Abbildung 4.13 zu sehen. Die IMUs werden in der gesamten Arbeit in der in Abbildung 2.12 zu sehenden Anordnung in die Schweißbänder eingelegt. Dies ergibt die in Abbildung 4.14 zu sehende Orientierung der Koordinatenachsen am Körper. Ausgehend davon werden die Teilkörperbewegungen analysiert und mithilfe der Orientierungen die zur Erkennung der Zeitpunkte gewählten Parameter erläutert.

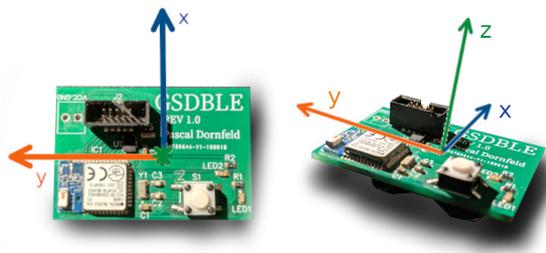


Abbildung 4.13: Koordinatenachsen der Sensoren



Abbildung 4.14: Koordinatenachsen der Sensoren am Sportler

Wurfhand

Da sich die Erkennung aller Zeitpunkte relativ zum Wurfzeitpunkt orientieren soll, ist die Erkennung dieses Zeitpunkts als Erstes durchzuführen. Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, nimmt die Geschwindigkeit des Speers und somit auch die Geschwindigkeit von Wurfhand und Handgelenk bis zum Abwurfzeitpunkt immer stärker zu. Dies bedeutet im Umkehrschluss einen Anstieg der Beschleunigung bis zum Abwurf des Speers. Zum Abwurfzeitpunkt ist die maximale Geschwindigkeit von Hand und Speer erreicht. Nach dem Abwurf nimmt die Geschwindigkeit der Hand wiederum ab. Daraus lässt sich folgern, dass der Zeitpunkt des Abwurfs die höchste Beschleunigung des Handgelenks aufweist. Da die Beschleunigung der Wurfhand an allen drei Koordinatenachsen der IMU anliegt, ist dabei die Betrachtung der Gesamtektorenlänge aller drei Achsen sinnvoll. Der Vergleich mit dem durch das Videomaterial des Wurfs identifizierten Wurfzeitpunkt bestätigt diese Theorie.

Auffällig bei der Analyse der Gesamtbeschleunigungsdaten ist außerdem, dass zwischen Start der Beschleunigung und dem Zeitpunkt des Abwurfs ein kurzer und verhältnismäßig starker Abfall der Beschleunigung festzustellen ist.

Diese Beobachtung lässt sich dadurch begründen, dass im Ablauf des Speerwurfs zuerst die Schulter des Werfers beschleunigt (siehe Abbildung 4.15b), um wie in Kapitel 2 erläutert eine größere Bogen- spannung durch Verwindung (Abbildung 2.2) aufzubauen. Steht die Schulter in etwa senkrecht zur Wurfrichtung (siehe Abbildung 4.15c), so beschleunigt im Anschluss der Arm (Abbildung 4.15d). Beim Beschleunigen der Schulter beschleunigt die Hand zwangsweise etwas mit, weshalb auch schon bei dieser Bewegung eine Beschleunigung des Sensors erfasst wird. Steht die Schulter in etwa senkrecht zur Laufrichtung, so beginnt die aktive Beschleunigung des Arms. Die Beschleunigung der Hand während dieses Übergangs sinkt kurzzeitig, um danach bis zum Zeitpunkt des Abwurfs weiter zu steigen. Dies lässt sich mit dem Übergang zwischen zwei verschiedenen Bewegungsmustern begründen. Zusätzlich lässt sich diese Annahme mit den zu den Aufnahmen gehörenden Videodaten bestätigen.

Der Startzeitpunkt der aktiven Armbewegung wird ebenfalls erfasst. Im Bewegungsablauf ist es wichtig, dass die aktive Beschleunigung des Arms erst nach Setzen des Stemmschritts vollzogen wird. Mit Hilfe dieses Zeitpunkts lässt sich eine verfrühte Beschleunigung des Wurfarms identifizieren. Als Begrenzung des Erkennungsbereichs des Stemmschritts wird ein Orientierungspunkt gewählt. Dieser ist zeitlich so

weit hinter dem Abwurf wie der Beginn der Armbewegung vom Abwurf entfernt ist. Dieser Zeitpunkt markiert vage das Ende der generellen Wurfbewegung. Dies ist hinreichend, da es sich dabei lediglich um eine Eingrenzung des Suchbereichs handelt.

Abbildung 4.16 zeigt beispielhaft die vom System identifizierten Zeitpunkte der Handbewegung auf den betrachteten Beschleunigungsdaten der IMU am Handgelenk.

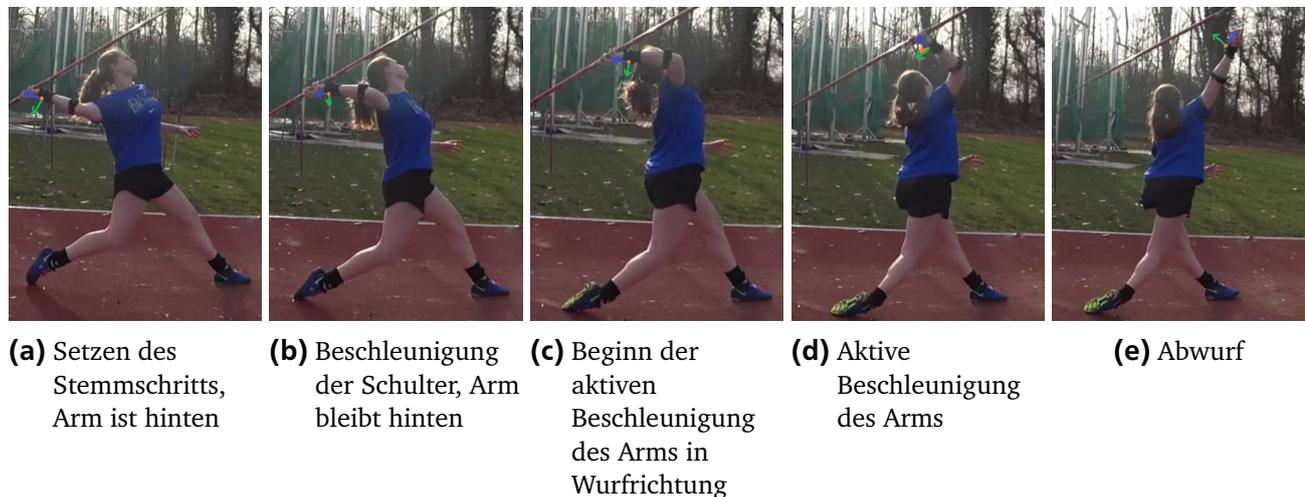


Abbildung 4.15: Ablauf der Armbewegung

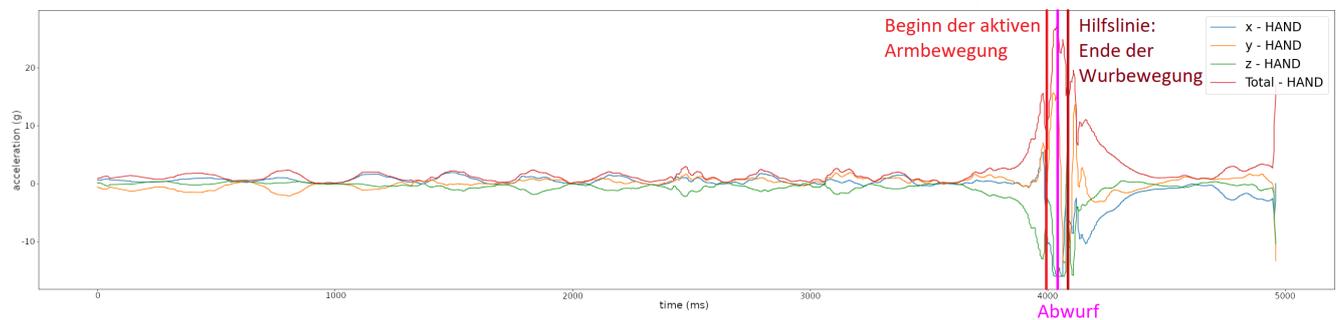


Abbildung 4.16: Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Handsensors anhand der Beschleunigungsdaten

Stemmbein

Für die Erkennung des Stemmschritts wird ebenfalls die Gesamtvektorlänge betrachtet. Die Erkennung des Stemmschritts ist auch auf Grundlage der x-Achse der durch die IMU gemessenen Beschleunigung möglich. Aus Gründen der einfacheren Handhabung durch das dadurch nicht mehr notwendige Einsetzen der IMU in richtiger Richtung oder das Kalibrieren der IMU wird die Gesamtvektorlänge bevorzugt. Als Zeitraum, in dem der Stemmschritt zu suchen ist, wird der Anfang der Aufnahme bis zum Ende der Wurfbewegung gewählt. Setzt der Stemmschritt erst deutlich nach Ende des Abwurfs – zum Ende der generellen Bewegung des Wurfarms – auf, so handelt es sich um einen starken bewegungstechnischen Fehler, der leicht zu identifizieren und aus diesem Grund nicht Teil des Assistenzsystems ist.

Das System betrachtet – ausgehend vom Zeitpunkt des Endes der Armbewegung – die letzten zwei Ausschläge der Gesamtvektorlänge der Beschleunigung. Der Stemmschritt sollte in der Theorie unter allen Schritten die mit Abstand größte Gesamtbeschleunigung besitzen. Dies lässt sich durch das intensive Auftreten des Stemmschritts während des Stemmschritts erklären (siehe Kapitel 2). Aus diesem Grund sollte zu diesem Zeitpunkt die höchste Beschleunigung auf die IMU des Stemmschritts wirken. Um den

Fällen nachzukommen in denen der Zeitpunkt des Stemmsschritts nicht die intensivste Beschleunigung aufweist, werden nur Ausschläge betrachtet, die zeitlich nahe am Endzeitpunkt des Wurfs zu finden sind. Aufgrund der zuvor erwähnten Nicht-Skalierbarkeit wird kein fester Zeitwert als Begrenzung verwendet. Stattdessen werden die letzten zwei Peaks des Zeitraums betrachtet. Diese Entscheidung wurde getroffen, da in der Theorie nach Setzen des Stemmsschritts bis zum Ende der Abwurfbewegung keine Bewegung des Stemmbeins mehr auftreten sollte. Da es allerdings vorkommen kann, dass ein Rutschen des Stemmfußes fälschlicherweise als Schritt gewertet wird, wird zusätzlich zum letzten auch der vorletzte Peak betrachtet. Ist die maximale Beschleunigung des vorletzten Peaks mindestens 1,5-mal so stark wie die des letzten, so ist davon auszugehen, dass der letzte Peak auf das Rutschen des Sportlers auf dem Boden zurückzuführen ist. Der vorletzte Peak wird in diesem Fall als Stemmsschritt gewählt, da das Setzen des Beins eine deutlich höhere Beschleunigung als das bloße Rutschen zur Folge haben sollte. Diese Methode erweist sich auf den Beispieldaten mit dem gewählten Faktor von 1,5 als korrekt. Zusätzlich dazu soll mit Hilfe der am Stemmbein befestigten IMU der Zeitpunkt des drittletzten Schritts vor dem Abwurf des Speers erkannt werden, um mit dessen Hilfe den Zeitraum zum Setzen des Impulsschritts ermitteln und ausgeben zu können. Dieser dient anschließend dem Trainer bei Bedarf als Möglichkeit, das Verhältnis zwischen Impuls- und Stemmsschritt zu überprüfen. Um den Zeitpunkt des drittletzten Schritts zu ermitteln, werden die Ausschläge der Gesamtbeschleunigung vor dem Zeitpunkt des Impulsschritts des Druckbeins (dem zweitletzten Schritt vor dem Abwurf) betrachtet. Dazu wird der zeitlich nächste Peak vor dem Impulsschritt gewählt. In einigen Fällen sorgt auch hier ein Rutschen des Athleten für einen erkannten Peak. Ist die Beschleunigung des vorherigen Peaks mindestens 1,5-mal so stark wie der des Gewählten, so kann auch hier davon ausgegangen werden, dass dies der Zeitpunkt des drittletzten Schritts ist.

Abbildung 4.17 zeigt die zu erkennenden Zeitpunkte auf Grundlage des Beschleunigungssensors der am Stemmbein befestigten IMU.

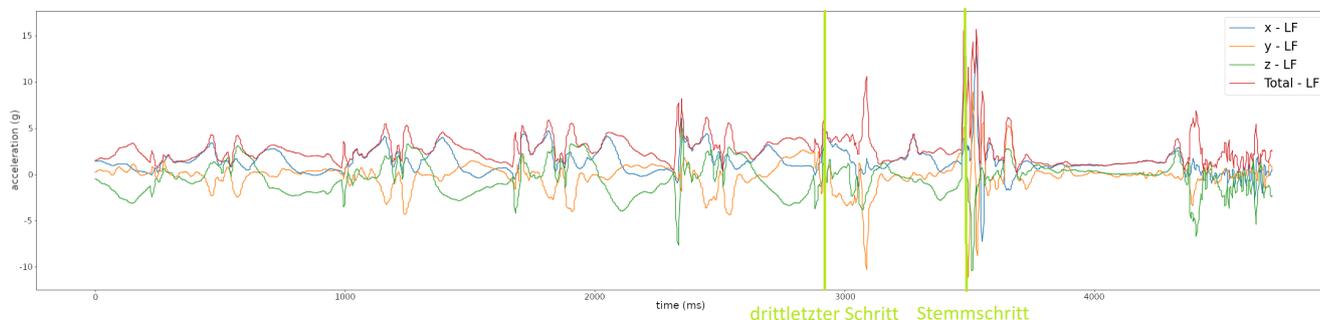


Abbildung 4.17: Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Stemmbeins anhand der Beschleunigungsdaten

Druckbein

Wie auch beim Stemmbein wird zur Erkennung der wichtigen Zeitpunkte des Druckbeins die Gesamtvektorlänge betrachtet. Die Begründung dafür ist wie schon zuvor die einfachere Handhabung der Sensoren für den Anwender. Um den Impulsschritt zu erkennen, wird der Zeitraum vor dem Setzen des Stemmsschritts betrachtet. Zusätzlich zu dieser Bedingung muss sich der Zeitpunkt des Impulsschritts vor dem Zeitpunkt des Abwurfs befinden, da es sich sonst um einen groben bewegungstechnischen Fehler handelt, der leicht von Trainern zu identifizieren ist. Im Falle einer guten Wurfbewegung befindet sich der Zeitpunkt der Wurfbewegung immer zeitlich hinter dem des Stemmsschritts, so dass die Einschränkung des Zeitraums durch die zweite Bedingung im Idealfall nicht nötig ist.

Zur Erkennung des Zeitpunktes werden die zwei zeitlich letzten Peaks des Zeitraums betrachtet. Dies hat denselben Grund wie schon beim Stemmbein. In der Theorie müsste es sich ebenfalls beim letzten identifizierten Ausschlag um den Impulsschritt handeln. Da auch in diesem Fall ein starkes Rutschen des

Athleten zu einem erkannten Peak führen könnte, werden jedoch erneut die letzten beiden Zeitpunkte betrachtet. Ist der vorletzte Peak mindestens 1,5-mal so hoch wie der erste, so handelt es sich bei diesem vermutlich um den Impulsschritt. Ist dies nicht der Fall, so handelt es sich stattdessen beim letzten Schritt um den Impulsschritt.

Des Weiteren haben manche Sportler die Angewohnheit, während des Setzens des Stemmbeins das Druckbein wieder vom Boden abzuheben (siehe Abbildung 4.18). Dies ist eine Eigenart der Werfer und kein Fehler in der Bewegung im eigentlichen Sinne. Allerdings kommt es in einigen Fällen dazu, dass dieser Effekt als Impulsschritt gewertet wird, wenn der dabei auftretende Peak vor dem Peak des Stemmschritts auftritt (siehe Abbildung 4.19). Um dem entgegenzuwirken, wird deshalb zusätzlich sichergestellt, dass der erkannte Zeitpunkt des Impulsschritts auftritt, bevor das Setzen des Stemmbeins beginnt.



Abbildung 4.18: Abheben des Druckbeins vor dem Setzen des Stemmbeins

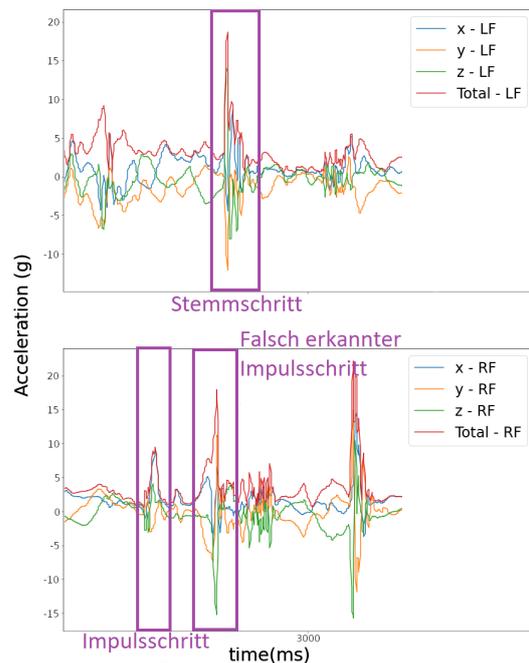


Abbildung 4.19: Beschleunigungen an Druck- und Stemmbein mit Stemmschritt, Impulsschritt und versehentlich angenommenem Impulsschritt

Zusätzlich zum Zeitpunkt des Stemmschritts soll auch der Zeitpunkt des Abfangschritts nach dem Wurf mithilfe der IMU des Stemmbeins ermittelt werden. Dieser dient dazu, den Zeitraum der gesamten Wurfbewegung einzugrenzen. Der erste Abfangschritt eines Athleten findet nach dem Abwurf des Speers statt. Dabei wird das Stemmbein dazu verwendet, den Körper des Athleten abzubremsen, um die Abwurfline nicht zu übertreten (siehe Kapitel 2, Abbildung 2.4). Deshalb wird der erste Peak nach dem Abwurf als Abfangschritt gewählt. Ist aufgrund eines Standabwurfs (siehe Kapitel 2) oder dem zu frühen Beenden der Aufnahme durch den Trainer kein Abfangschritt zu finden, so wird das Ende der Aufnahme als Zeitpunkt des Abfangschritts gewählt. Dies ist für die Eingrenzung des Zeitraums hinreichend. Die Zeitpunkte von Impulsschritt und Abfangschritt auf den Beschleunigungsdaten der am Druckbein befestigten IMU sind beispielhaft in Abbildung 4.20 zu sehen.

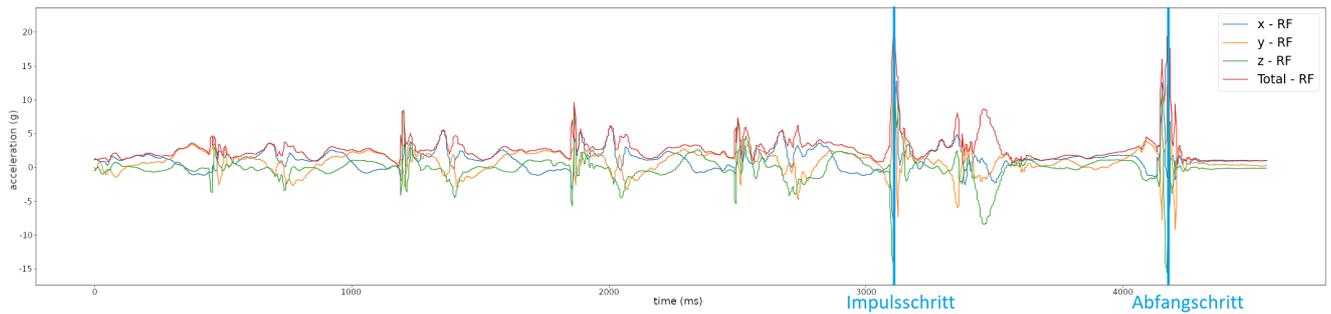


Abbildung 4.20: Durch das System identifizierte Zeitpunkte des Druckbeins anhand der Beschleunigungsdaten

Hüfteinsatz

Der Hüfteinsatz ist von allen zu erkennenden Bewegungen die kleinste. Dadurch ist sie die durch den Trainer am schwierigsten zu identifizierende Komponente des Ablaufs. Dabei wird die IMU nach Aufsetzen des Druckbeins entlang ihrer z-Achse beschleunigt (siehe Abbildung 4.21).



(a) Setzen des Impulsschritts **(b)** Beginn des Hüfteinsatzes **(c)** Setzen des Stemmschritts **(d)** Beginn der Abwurfbewegung **(e)** Abwurf

Abbildung 4.21: Bewegung der Hüfte während des Hüfteinsatzes

Setzt das Stemmbein auf, so steht die Hüfte in etwa senkrecht zur Abwurfrichtung (siehe 4.21c). In dieser Position wird die Geschwindigkeit der Hüftbewegung in z-Richtung schlagartig verringert, was durch die starke negative Beschleunigung der z-Achse in Abbildung 4.22 zu erkennen ist. Gleichzeitig wird die Hüfte des Werfers in x-Richtung der IMU während des Abwurfs beschleunigt (siehe 4.21d und 4.21e). Dies ist zu sehen am starken Anstieg der Beschleunigung in x-Richtung während des Abbremsens in z-Richtung in Abbildung 4.22. Wie in Kapitel 2 erläutert, muss dabei der Beginn der Hüftbeschleunigung zwischen Impuls- und Stemmtritt liegen, um einem guten Bewegungsablauf zu entsprechen. Um den Zeitpunkt des Hüfteinsatzes zu erkennen, wird zunächst die maximale negative Hüftbeschleunigung in z-Richtung – also das abrupte Abbremsen der Hüfte – wenn diese in etwa senkrecht zur Wurfrichtung steht, betrachtet. In allen aufgezeichneten Daten ist dies die größte negative Beschleunigung der z-Achse und aus diesem Grund einfach zu identifizieren.

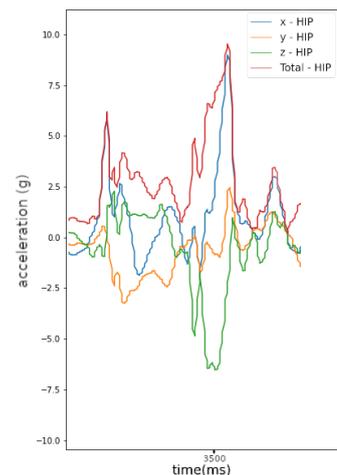


Abbildung 4.22: Beschleunigung der Hüfte während des Hüfteinsatzes

Als Suchbereich für die Erkennung des Endes des Hüfteinsatzes wird der Zeitraum zwischen Impulsschritt und Abwurf gewählt. Das liegt daran, dass die maximale Verwirrung der Hüfte (Abbildung 2.2) zwischen Impulsschritt und Abwurf liegen muss, um effektiv Spannung zugunsten der Abwurfgeschwindigkeit des Speers aufbauen zu können (siehe Kapitel 2). Ausgehend vom Endpunkt der Hüftbewegung in z-Richtung wird nun der erste Peak der Hüfte in positiver z-Richtung betrachtet und als Zeitpunkt des Hüfteinsatz-

zes gewählt. Findet sich kein Peak, so ist die Intensität der Hüftbeschleunigung unzureichend und der Hüfteinsatz wird als nicht vorhanden gewertet.

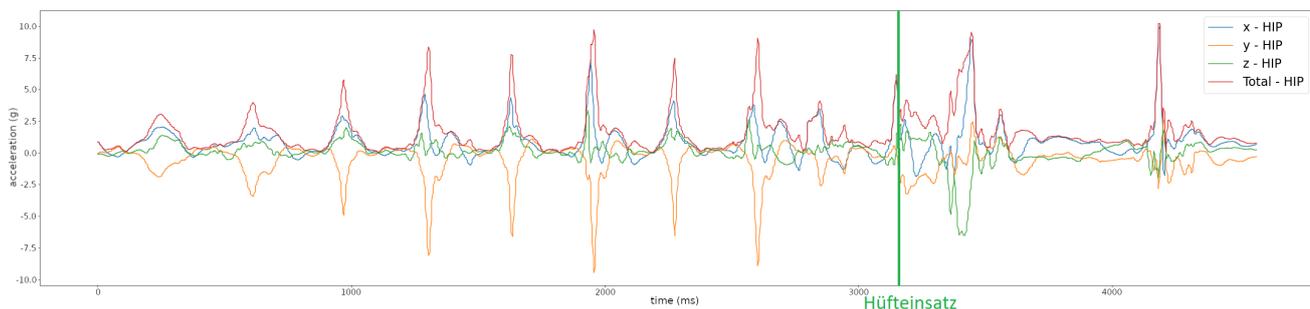


Abbildung 4.23: Durch das System identifizierter Zeitpunkt des Hüfteinsatzes anhand der Beschleunigungsdaten

Auswertung

Die erkannten Zeitpunkte müssen anschließend miteinander verglichen werden. Dabei wird bewertet, ob sich der Ablauf der Bewegungen in der richtigen Reihenfolge befindet.

Liegt der Startzeitpunkt des Hüfteinsatzes vor dem des Impulsschritts, so soll dem Nutzer mitgeteilt werden, dass die Hüftbewegung zu früh startet. Startet der Hüfteinsatz zu spät, so ist auch das dem Nutzer mitzuteilen. Wird zuvor kein Hüfteinsatz erkannt, soll dem Nutzer dies ebenfalls rückgemeldet werden. Außerdem soll in diesem Fall durch eine Warnmeldung darauf hingewiesen werden, die richtige Anbringung der Sensoren zu überprüfen. Dies war bei der Aufnahme der Beispieldaten der häufigste Grund für diesen Fall. Liegt der Zeitpunkt des Stemmschritts nach dem des Wurfbeginns, soll der Nutzer darauf hingewiesen werden, dass die Abwurfbewegung zu früh erfolgt ist. In den Fällen, in denen Aufnahmen zu früh beendet werden, sodass bestimmte Zeitpunkte nicht identifiziert werden können, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Tritt keiner der oben genannten Fälle ein, soll dem Nutzer die Korrektheit des Ablaufs der Bewegung zurückgemeldet werden. Der Ablauf der Auswertung ist in Abbildung 4.24 zu sehen.

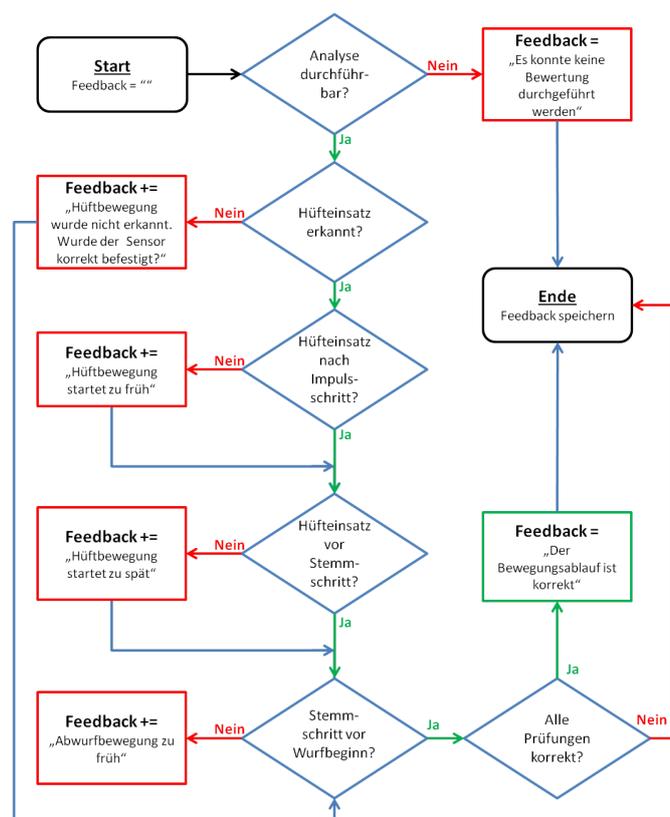


Abbildung 4.24: Ablauf der Auswertung

Zusätzlich zur Bewertung sollen dem Nutzer Zeiträume zwischen einigen Ereignissen sowie die maximale Beschleunigung von Wurfarm und Hüfte angegeben werden. Die Beschleunigung von Arm und Hüfte sind insofern interessant, als dass diese große Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten des Wurfs und somit auf das Gesamtergebnis haben, sofern der Bewegungsablauf korrekt ist. Daher kann es sinnvoll für Nutzer sein, die maximalen Beschleunigungen dieser Bewegungen zu betrachten, um eventuelle Steigerungen verfolgen zu können. Ähnlich

verhält es sich mit den Zeiträumen zwischen den einzelnen Bewegungen. Diese gelten vor allem als Orientierung für Nutzer und sollen die Möglichkeit bieten Zusammenhänge festzustellen. Außerdem ist es durch die Ausgabe der Zeiten möglich, den Bewegungsablauf auf das Verhältnis zwischen Impulsschritt und Stemmschritt zu überprüfen. Dieser Aspekt wird nicht direkt in das Bewertungssystem übernommen, da er je nach Trainer unterschiedlich behandelt und priorisiert wird. Damit wird dieses Kriterium als nicht allgemeingültig genug betrachtet. Eine gesonderte Betrachtung für Nutzer, denen dieser Aspekt wichtig ist, ist durch die Ausgabe der Zeiträume dennoch möglich.

4.3 Zusammenfassung

Bei der Entwicklung des Systems wurde sich aktiv für die Erkennung der Zeitpunkte des drittletzten Schritts vor dem Abwurf, des Impulsschritts, des Hüfteinsatzes, des Stemmschritts, des Beginns der Armbewegung und des Abwurfs entschieden. Da es sich um ein Assistenzsystem für Trainer und Sportler handeln soll, wurden diese Punkte aufgrund ihrer schnellen Abfolge als die am schwersten ohne Hilfe zu erkennenden Zeitpunkte identifiziert. Das System soll den Bewegungsablauf des Sportlers auf den Ablauf dieser Komponenten prüfen und den Nutzer auf eine falsche Ausführungsreihenfolge aufmerksam machen. Des Weiteren sollen zusätzliche Informationen wie Zeiträume zwischen den einzelnen Bewegungen und maximale Beschleunigung des Wurfarms und der Hüfte ausgegeben werden. Die Zeitpunkte der Bewegungen werden allesamt anhand der Beschleunigungsdaten der am Körper getragenen IMUs erkannt. Diese nehmen aufgrund des schnellen und kurzen Bewegungsablaufs mit einer Abtastrate von 416Hz auf. Die IMUs werden dazu am Handgelenk des Wurfarms, vor dem Hüftknochen auf der Seite des Wurfarms und an den Fußgelenken beider Beine in der in Abbildung 4.14 dargestellten Ausrichtung befestigt. Zur Analyse der Zeitpunkte der Schritte und des Wurfs wird der Gesamtvektor der Beschleunigung betrachtet, was Nutzern eine Kalibrierung oder eine korrekte Ausrichtung der IMUs erspart. Für die Erkennung des Hüfteinsatzes wird die z-Achse der IMU aufgrund der entscheidenden Beschleunigung entlang dieser Achse während des Hüfteinsatzes betrachtet. Auf Grundlage dieser Zeitpunkte wird anschließend die Analyse des Bewegungsablaufs durchgeführt. Abbildung 4.25 zeigt einen idealen Bewegungsablauf inklusive der erkannten Zeitpunkte. Dabei entsprechen die farblichen Markierungen denen, die in den Abbildungen 4.16, 4.17, 4.20, 4.23 dargestellt sind. Um die Darstellung für Nutzer übersichtlicher zu gestalten, werden nur die betrachteten Achsen sowie die erkannten Zeitpunkte dargestellt.

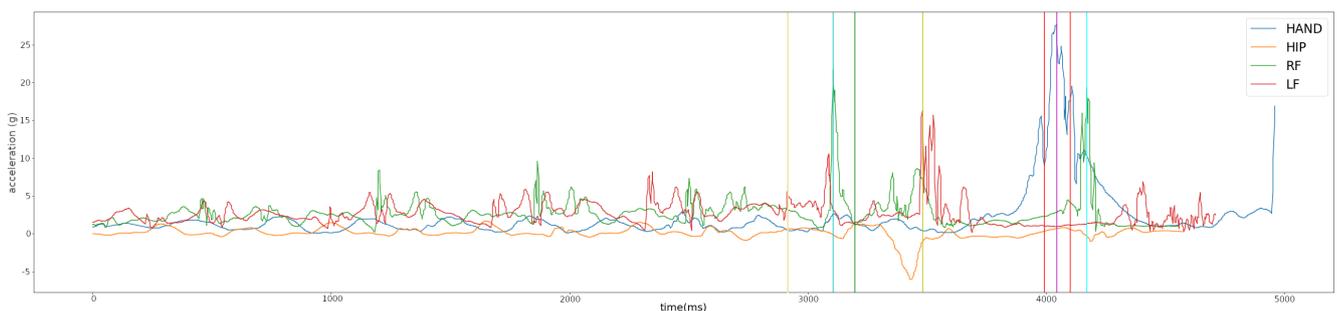


Abbildung 4.25: Identifizierte Zeitpunkte der in diesem Kapitel als Beispiel verwendeten Aufnahme



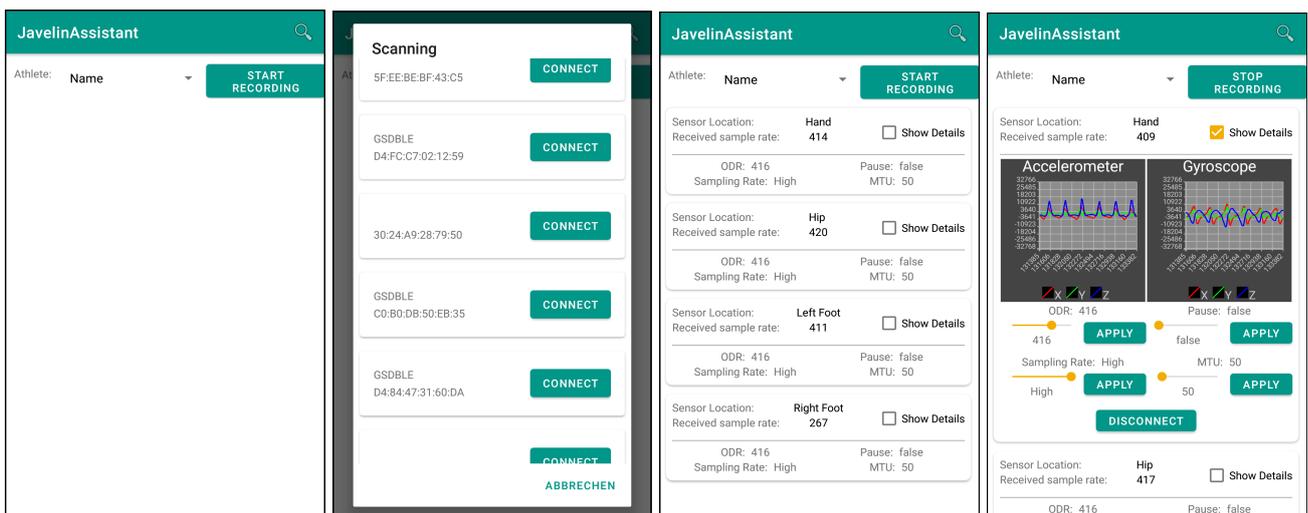
5 Implementierung

Die Implementierung einer Android-App zur Aufnahme der Sensordaten sowie die des in Kapitel 4 beschriebenen Systems, das die aufgenommenen Daten verarbeiten und analysieren soll, werden im Folgenden erläutert.

5.1 Aufnahmen der Daten

Zur Aufnahme der Daten wird eine Android-App verwendet. Diese basiert auf der in [Dor19] entwickelten und in [Mül20] weiterentwickelten Android-App. Die IMUs sind dort mit der App via Bluetooth Low Energy verbunden und senden über diese Verbindung ihre Daten mit der in der App festgelegten Rate [Dor19]. Funktionen wie das Verbinden und Trennen der Sensoren, Anzeigen und Speichern der Sensordaten, Beschriften der Aufnahmen und das Hinzufügen von Notizen zu den Aufnahmen existieren bereits. Die Aufnahmedauer wird in der App festgelegt. Nach einem Countdown von drei Sekunden startet die Aufnahme und wird nach Ablauf der eingestellten Aufnahmedauer beendet. Die aufgezeichneten Daten werden jeweils nach der Aufnahme in einer separaten JSON¹-Datei gespeichert.

Da die zuvor genannten Funktionen zu großen Teilen für die Nutzung der App zum Aufnehmen der Wurfbewegungen ausreichen, werden nur kleine Veränderungen vorgenommen. Die zu wählende Aufnahmedauer wird entfernt, da es sich wie in den Kapiteln 2 und 4 erwähnt bei der Speerwurfbewegung um einen Bewegungsablauf mit unterschiedlichen Zeitspannen handeln kann. Aus diesem Grund ist ein festgelegter Zeitraum für die Aufnahme nicht sinnvoll. Die Aufnahme wird stattdessen manuell durch drücken eines Buttons beendet. Auch wird der Countdown nach Betätigen des Aufnahmebuttons und vor Beginn der Aufnahme entfernt, um die Aufnahme direkt starten zu können. Die Möglichkeit Aufnahmen zu beschriften, wird beibehalten. Sinn der Funktion ist nun aber nicht mehr, der Aufnahme eine Sportart zuzuweisen, sondern einen Athleten. Das Verbinden der Sensoren sowie das Anzeigen verbundener Sensoren und deren Daten wird ebenfalls von [Mül20] übernommen.



(a) Ansicht beim Start der App (b) Verbinden mit den Sensoren (c) Ansicht mit verbundenen Sensoren (d) Detailansicht eines Sensors und laufende Aufnahme

Abbildung 5.1: Screenshots der für das Aufnehmen der Daten genutzten App

¹ <https://www.json.org/json-en.html> – zuletzt aufgerufen am 4.5.2021

Um eine gute Erkennbarkeit auf dem Sportplatz – dem Ort der wahrscheinlichsten Nutzung – bieten zu können, wird außerdem ein helles Design der App entwickelt. Abbildung 5.1 zeigt die Nutzeroberfläche der App.

Um Verarbeitung und Analyse zukünftig in der App laufen zu lassen, wird mit Hilfe von Chaquopy² die Möglichkeit geschaffen, Python Code in die Android App einbinden zu können. Eine Trennung der Komponenten ermöglicht in dieser Arbeit jedoch eine effizientere Evaluation (siehe Kapitel 6) unter Pandemiebedingungen, da die Probanden nur Zeit für die Aufnahme der Daten aufwenden müssen, wodurch eine höhere Anzahl von Probanden möglich ist. Aus diesem Grund findet die Weiterverarbeitung der aufgenommenen JSON-Dateien außerhalb der App statt.

5.2 Verarbeitung der Daten

In [Mül20] wird die weitere Verarbeitung der JSON-Dateien in Python innerhalb eines Jupyter Notebooks³ implementiert. In der Vorverarbeitungsphase werden die Daten aus den JSON-Dateien ausgelesen. Den Sensoren werden Label abhängig von ihren MAC-Adressen zugewiesen, die auf die Anbringungsorte verweisen und der prozentuale Anteil der Paketverluste wird ermittelt. Dateien mit geringem Paketverlust und passender Aufnahmelänge werden zur weiteren Verarbeitung gespeichert. Anschließend werden die Zeitstempel der Sensoren abgeglichen und mithilfe von zuvor ermittelten Faktoren (siehe [Mül20]) neu skaliert. Dies ist nötig, um die Startzeiten der Sensoren zu synchronisieren und die Drifts der Sensoren zu kompensieren.

Das in dieser Arbeit verwendete System zum Verarbeiten und Analysieren der Wurfdaten ist ebenfalls in Python innerhalb eines Jupyter Notebooks implementiert. Dabei bauen das Laden, Überprüfen der Dateien und das Synchronisieren der Daten einer Datei auf den Implementierungen von [Mül20] auf. Das Laden der Dateien wurde komplett übernommen, das Prüfen der Dateien überarbeitet. So werden Aufnahmen nicht mehr aufgrund ihrer Paketverluste oder ihrer Länge aussortiert. Dies liegt zum einen daran, dass die Aufnahmen keine feste Länge haben, zum anderen kann es zu Paketverlusten kommen. Diese verfälschen in Tests – auch aufgrund der hohen Abtastrate – die Ergebnisse allerdings unmerklich. Aus diesem Grund erwiesen sich diese Daten als ausreichend für die Analyse und sollen deshalb nicht verworfen werden. Dateien, bei denen Daten eines Sensors komplett fehlen, werden hingegen aussortiert, da eine Auswertung der Dateien wie in Kapitel 4 beschrieben nur mit den Informationen aller Sensoren möglich ist.

Die Synchronisation der Sensordaten wird ebenfalls komplett aus [Mül20] übernommen. Bei aufgenommenen Testdaten (siehe Kapitel 4) fiel allerdings auf, dass die Zeitstempel der Sensoren nicht mit den realen Zeitpunkten übereinstimmten. Einerseits wurde mehreren Daten eines Sensors derselbe Zeitstempel zugeordnet, andererseits stimmte die Länge der Aufnahme der Sensoren nicht mit der durch das Videomaterial prüfbar realen Zeit überein. Die Doppelung der Zeitstempel lässt sich darauf zurückführen, dass diese erst beim Empfangen der Daten durch das Smartphone gesetzt werden. Gleichzeitig ankommende Pakete erhalten denselben Zeitstempel. Um dies zu umgehen, werden alle Daten jedes Sensors mit gleichem Zeitstempel im Zeitraum bis zum nächsten Zeitstempel gleichmäßig verteilt. Anschließend werden die Zeitstempel durch 1,02 geteilt, um diese an die reale Zeit anzupassen. Der Faktor von 1,02 wurde durch Testaufnahmen verschiedener Sensoren sowie verschiedener Längen und Datenraten aus dem Verhältnis der Systemzeit des Smartphones zu dem der Sensoren ermittelt. Im Anschluss werden die empfangenen Beschleunigungsdaten in Vielfache der Erdbeschleunigung g ($9,81 \frac{m}{s^2}$) umgerechnet. Um wie in Kapitel 4 beschrieben die Gesamtvektorlänge der Beschleunigungen nutzen zu können, wird diese im Anschluss errechnet. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Beschleunigung der Hüfte in Richtung der z-Achse des Hüftensors besteht das Risiko einer durch Rauschen verursachten falschen Identifizierung des Startpunkts des Hüfteinsatzes. Um dies zu verhindern, werden die Beschleu-

² <https://chaquo.com/chaquopy/> – zuletzt aufgerufen am 4.5.2021

³ <https://jupyter.org/> – zuletzt aufgerufen am 4.5.2021

nigungsdaten der z-Achse des Hüftensors gefiltert⁴ (siehe Abbildung 5.2).

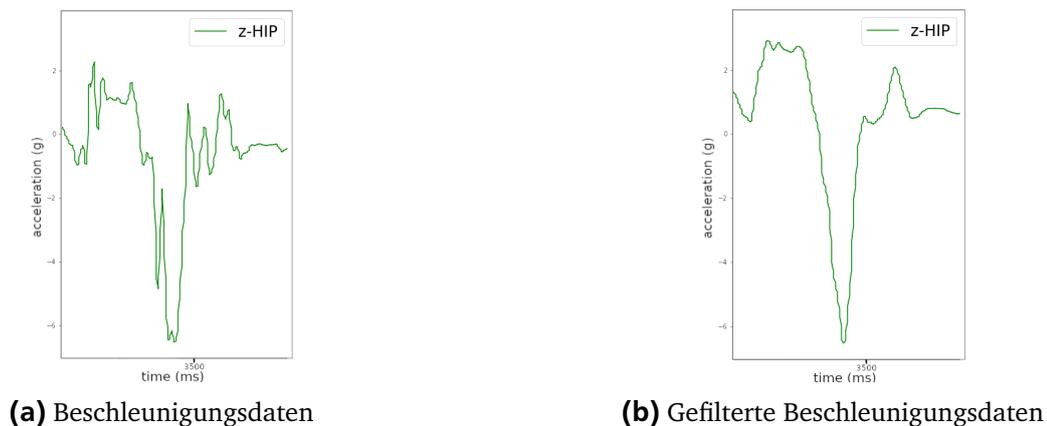


Abbildung 5.2: Filtern der Beschleunigungsdaten der Hüfte

Nach Verarbeitung der Daten werden die Peaks der Gesamtvektorbeschleunigungen von Hand- und beiden Beinsensoren, sowie die Peaks der z-Achse der Beschleunigung des Hüftensors mittels Peak Detection⁵ ermittelt. Die erkannten Ausschläge werden anschließend, wie in Kapitel 4 beschrieben, zur Erkennung der relevanten Zeitpunkte verwendet. Die dort festgelegten Zeitpunkte werden im Anschluss miteinander verglichen und mit Blick auf die korrekte Ausführungsreihenfolge ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertungen werden in einer CSV-Datei⁶ gespeichert. Dieses Dateiformat eignet sich zum einen zur Weiterverarbeitung der Daten, zum anderen kann sie von Nutzern einfach per Tabellenkalkulationsprogramm geöffnet werden. Hierbei wird pro Tag pro Sportler eine neue Datei auf Grundlage der in Kapitel 5.1 beschriebenen Namenswahl in der App sowie des Aufnahmedatums erstellt. Dies hat den Vorteil, dass Verbesserungen einzelner Sportler über die Zeit leichter zu verfolgen und Daten unterschiedlicher Sportler leichter voneinander zu trennen sind. Aussortierte Aufnahmen werden mit einer Fehlermeldung versehen in der CSV-Datei abgelegt. Zum Schluss besteht die Möglichkeit, die in Abbildung 4.25 zu sehenden erkannten Zeitpunkte und die analysierten Daten zu plotten.

5.3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit und in der in Kapitel 6 beschriebenen Evaluation wird ein System bestehend aus zwei Teilen verwendet. Die Aufnahme der Daten erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 5.1 beschriebenen Android-App, die auf der Arbeit von [Dor19] und [Mül20] aufbaut. Die von der App in JSON-Dateien gespeicherten Daten werden wie in Kapitel 4 beschrieben mit Hilfe von Python innerhalb eines Jupyter Notebooks verarbeitet und analysiert (Kapitel 5.2). Sowohl das Laden, als auch die Synchronisation der Sensordaten bauen dabei auf der Arbeit von [Mül20] auf. Für die Zukunft sind Verarbeitung und Analyse der Daten innerhalb der App durch die Möglichkeit der Einbindung von Python-Code mittels *Chaquopy* möglich.

⁴ <https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.signal.lfilter.html#scipy.signal.lfilter> – zuletzt aufgerufen am 5.5.2021

⁵ <https://pythonawesome.com/overview-of-the-peaks-detection-algorithms-available-in-python/> – zuletzt aufgerufen am 4.5.2021

⁶ <https://fileinfo.de/extension/csv> – zuletzt aufgerufen am 4.5.2021



6 Evaluation

Im Folgenden wird auf die Evaluation des in Kapitel 4 und 5 beschriebenen Systems eingegangen. Dazu werden zunächst Ziel der Evaluation, Probanden sowie Vorgehensweise bei der Aufnahme und Auswertung der Evaluationsdaten beschrieben. Anschließend werden die Auswertungsergebnisse beschrieben und analysiert, zum Abschluss wird ein Fazit gezogen.

Aufgrund der Corona-Pandemie wurden die Aufnahmen der Evaluationsdaten nach den zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden Hygienevorschriften und genehmigten Hygienekonzepten der beteiligten Sportvereine durchgeführt.

6.1 Ziel und Vorgehen

Das System soll auf seine Tauglichkeit im Anwendungsfall getestet werden. Dazu werden Würfe von Speerwerfern verschiedener Leistungsklassen durch das System aufgenommen, mit der Einschätzung durch Trainer verglichen, sowie die Richtigkeit der Einschätzungen analysiert. Die insgesamt 28 teilnehmenden Sportler, allesamt Leichtathleten verschiedener Vereine, führten dazu jeweils fünf Würfe unter möglichst realistischen Trainingsbedingungen durch.

Die Aufnahmen werden zusätzlich an verschiedenen Tagen und Orten mit unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt, um mögliche Auswirkungen dieser Parameter auf das System überprüfen zu können. Dazu werden die Würfe auf der Speerwurfanlage zweier Stadien – im Freien – sowie in der Halle, typischen Orten für Trainings und Wettkämpfe in der Leichtathletik, durchgeführt. Die Aufnahmen in den Stadien werden dabei mit den jeweiligen, den Sportlern zugeordneten Speergewichten durchgeführt. Die Aufnahmen in der Halle wird mit Hilfe eines im Training genutzten Hallenspeeres durchgeführt. Zusätzlich zu den Orten werden Aufnahmen im Freien unter unterschiedlichen Wetterbedingungen – Regen und Sonnenschein – absolviert. Um die Unterschiede zwischen Halle und Stadion besser vergleichen zu können, werden außerdem Aufnahmen der Würfe von drei Athleten unterschiedlicher Leistungsklassen (2, 3 und 4) sowohl in der Halle als auch im Stadion durchgeführt. Dies führt zu insgesamt 31 verschiedenen Sportlern und Bedingungen (im Folgenden Probanden). Mit jeweils fünf Datensätzen pro Proband existieren insgesamt 155 Datensätze.

Um die Tauglichkeit des Systems in verschiedenen Leistungsklassen vergleichen zu können, werden die Probanden zu Beginn mithilfe ihrer Trainer in eine von vier verschiedenen Leistungsklassen eingeordnet.

	Leistungsklasse 1	Leistungsklasse 2	Leistungsklasse 3	Leistungsklasse 4	Gesamt
Halle	0	3	3	3	9
Regen	2	4	3	1	10
Sonne	2	7	3	0	12
Gesamt	4	14	9	4	31

Tabelle 6.1: Probanden unterteilt in Leistungsklasse und Umstände der Aufnahme

Leistungsklasse 1 beschreibt dabei Anfänger, Sportler die wenig bis gar keine Erfahrung im Speerwurf haben. In *Leistungsklasse 2* werden Sportler eingeordnet, die die Grobform des Bewegungsablaufs beherrschen. In dieser Kategorie befinden sich vor allem Mehrkämpfer, die diese Disziplin nicht intensiv trainieren. Sportler, die in *Leistungsklasse 3* eingeordnet werden, beherrschen bereits die Feinform der Wurfbewegung. Diese sind Speerwerfer, die erfolgreich an Wettkämpfen im Speerwurf teilnehmen oder Mehrkämpfer, die regelmäßiges Speerwurftraining durchführen. In *Leistungsklasse 4* sind Sportler eingeordnet, die die Feinstform der Wurfbewegung beherrschen. Hierunter fallen vor allem Kaderathleten.

Tabelle 6.1 zeigt die Anzahl der Probanden pro Leistungsklasse sowie deren Verteilung unter den verschiedenen Aufnahmebedingungen.

Zusätzlich zu den Aufnahmen der Sensordaten mit Hilfe der in Kapitel 5.1 beschriebenen App werden zum Verifizieren der erkannten Bewegungsabläufe Videodaten der Würfe aufgenommen. Dazu wird eine Kamera mit einer Bildrate von 60 Bildern pro Sekunde so aufgestellt, dass sie den Werfer von der Seite des Wurfarms aus aufnimmt (siehe Abbildung 6.1). Diese Position wird gewählt, da von dort aus die wichtigsten, in die Analyse einbezogenen Körperteile am besten zu erkennen sind. Versuchsaufbau und Aufnahme der Daten von Linkshändern – zwei Probanden – werden äquivalent zu denen von Rechtshändern, allerdings mit vertauschten Seiten der Sensorpositionen und der Kameraposition durchgeführt (siehe Kapitel 2).

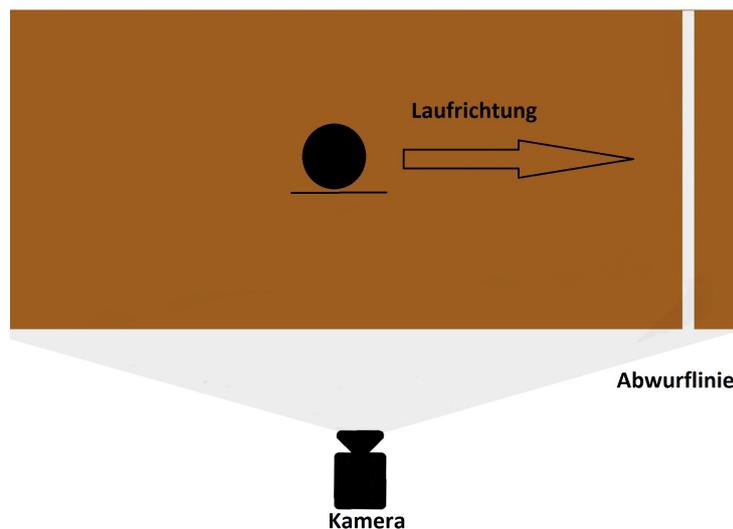


Abbildung 6.1: Konzeptzeichnung des Versuchsaufbaus bei Würfungen mit der rechten Hand

Kommentare und Bewertungen des anwesenden Trainers werden außerdem für den nachträglichen Vergleich durch ein an der Kamera montiertes Mikrophon aufgenommen. Im Anschluss an die Aufnahme werden die Daten – wie in Kapitel 5.2 beschrieben – weiterverarbeitet und ausgewertet.

Im Rahmen der Evaluation wird die Einschätzung des Systems mit der des Trainers, welcher den Bewegungsablauf mit den im Trainingsalltag üblich Hilfsmitteln (siehe Kapitel 3) bewertet, verglichen. Zusätzlich wird die Einschätzung des Systems durch eine nachträgliche ausführliche Videoanalyse des Bewegungsablaufs mithilfe der Software Kinovea¹ auf seine Korrektheit untersucht. Stimmen die Einschätzungen von System und Trainer nicht überein, die Analyse des Videomaterials lässt aber auf eine korrekte Einschätzung des Systems schließen, so überprüft der Trainer die Auswertung mit Hilfe der Videoanalyse erneut. Liegt anschließend nach Auffassung des Trainers das System richtig, so wird die Bewertung des Systems als korrekt gewertet. Liegt das System falsch, so wird bewertet, ob der Trainer den Fehler des Systems leicht ohne die Nutzung der Videoaufnahme als solchen identifizieren kann. Dies ist dann der Fall, wenn die Einschätzung des Systems unter keinen Umständen zum gesehenen Bewegungsablauf passt. Die in der Analyse für korrekt erklärten Einschätzungen durch das System werden im Anschluss in Form eines Analysebogens (siehe Abbildung 6.2) an den jeweiligen Probanden sowie dessen Trainer geschickt. Auf Grundlage dieser Rückmeldung und den bei der Aufnahme gesammelten Erfahrungen sollen Probanden und Trainer zusätzlich eine Einschätzung abgeben, ob eine Unterstützung durch ein System dieser Art im Trainingsalltag hilfreich sein könnte.

¹ <https://www.kinovea.org/> – zuletzt aufgerufen am 6.5.2021

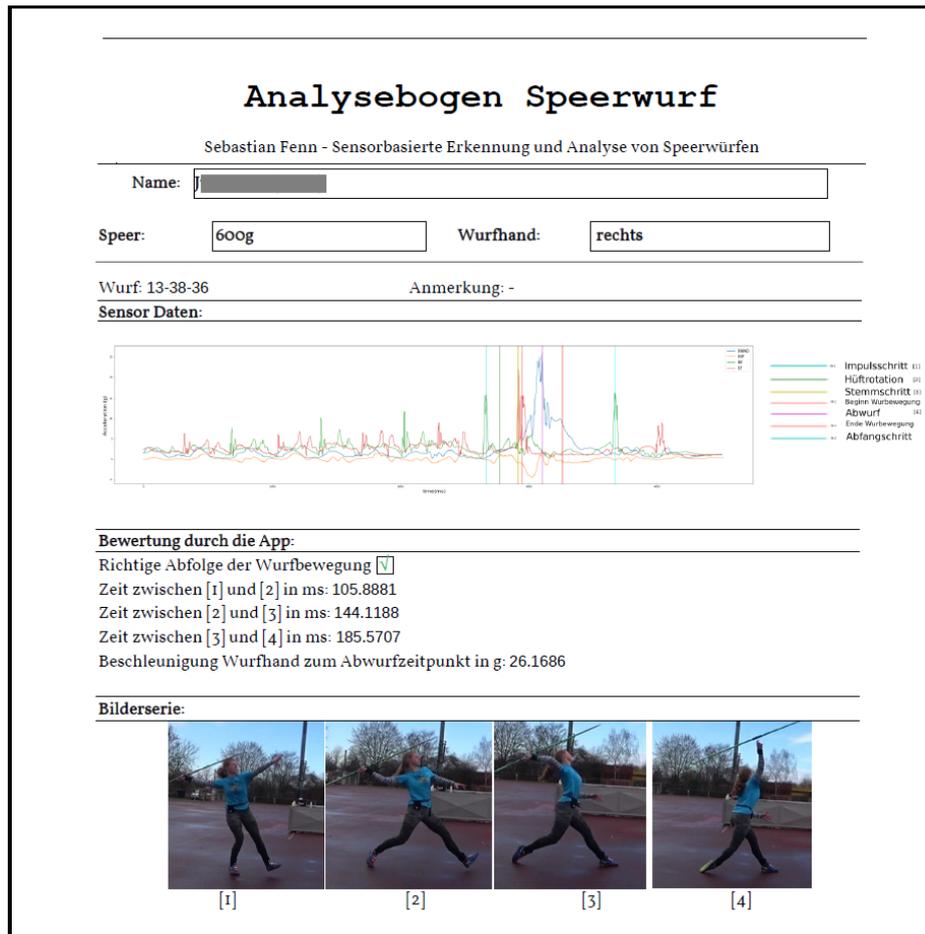


Abbildung 6.2: Ausschnitt eines der Analysebögen der Probanden

6.2 Auswertung

Von den 155 aufgenommenen Würfeln können 150 durch das System untersucht werden. Fünf der Würfe werden vom System als nicht analysierbar beurteilt und aussortiert. In vier Fällen werden die Daten während des Ladeprozesses aufgrund fehlender Daten eines oder mehrerer Sensoren, aus den in Kapitel 5.2 genannten Gründen, aussortiert. Bei einer der aussortierten Aufnahmen wird die Aufnahme des Sensors an der Hand zu früh beendet. Deshalb ist eine Identifizierung des Wurfzeitpunkts nicht möglich und die Aufnahme wird in der Auswertungsphase, wie in Kapitel 4 beschrieben, als nicht bewertbar markiert. Die übrigen Aufnahmen werden anschließend auf die zuvor genannten Aspekte untersucht.

Schwierigkeiten

Bei zwei der Probanden fällt während der Analyse der Videodaten des Bewegungsablaufs eine unzureichende Anbringung des Hüftsensors auf. Dieser war nicht fest genug an der Hüfte der Probanden befestigt, sodass der Sensor die Bewegung der Hüfte nicht zuverlässig nachvollziehen kann (siehe Abbildung 6.3). Die Sichtung der Videodaten bestätigt diese Vermutung durch klar erkennbare fehlerhafte Einschätzungen des Bewegungsablaufs durch das System. Dieses geht von einer korrekten Anbringung der Sensoren aus und kann aus diesem Grund mit einer fehlerhaften Befestigung nicht umgehen. Da es sich dabei um einen Anwendungsfehler durch die Probanden handelt, werden die Daten (insgesamt zehn Stück) nicht in die Evaluation des Systems einbezogen.

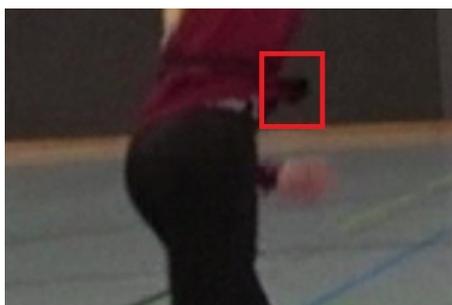


Abbildung 6.3: Fehlerhafte Befestigung des Hüftsensors

6.2.1 Ergebnisse

Die Auswertung der übrigen 140 Aufnahmen werden in die folgenden Kategorien einsortiert. Die Ergebnisse der Auswertungen werden auf allen getätigten Aufnahmen (*gesamt*), sowie unterteilt in *Leistungsklassen* und *Umstände* der Aufnahme betrachtet.

Korrektes Feedback

Die Kategorie *korrektes Feedback* betrachtet die Korrektheit der Einschätzungen von System und Trainer vor Ort. Dazu wird die Vorhersage des Systems mithilfe der erfassten Videodaten manuell überprüft.

Insgesamt lag das System in **82,9%** der Fälle mit der Einschätzung richtig.

100% der Einschätzungen des Systems in Leistungsklasse 4 waren korrekt. In Leistungsklasse 3 waren es 88,2% und dem Abwärtstrend folgend lag der Anteil korrekten Feedbacks in Leistungsklasse 2 bei 80,3% und in Leistungsklasse 1 bei 65%. Der Anteil korrekter Einschätzung durch das System nach Umständen liegt bei 75,4% bei Sonne, 86,4% bei Regen und 89,7% in der Halle.

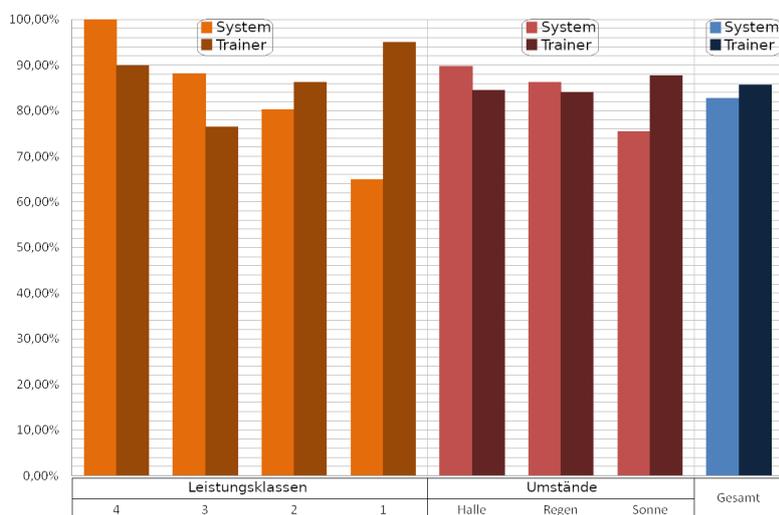


Abbildung 6.4: Korrektes Feedback

Die Bewertung der *Trainer* war in **85,7%** der Fälle korrekt.

In Leistungsklasse wurden 90% der Würfe richtig eingeschätzt. In Leistungsklasse 3 waren es 76,5% in Leistungsklasse 2 hingegen 86,4%. Der größte Anteil korrekter Einschätzungen ist in Leistungsklasse 1 mit einem Anteil von 95% zu finden. Bei Sonne waren 87,7% der Rückmeldungen korrekt. Bei Regen waren es 84,1% und in der Halle 84,6%.

Abbildung 6.4 zeigt den Anteil der korrekten Rückmeldungen durch Trainer und System in dieser Kategorie.

Übereinstimmendes Feedback

Diese Kategorie erfasst den Anteil übereinstimmender korrekter Einschätzungen von Trainer vor Ort und System. In **70%** der Fälle stimmt das Feedback beider Parteien überein.

Dabei haben Einschätzungen in der Leistungsklasse 4 mit 90% den höchsten Anteil übereinstimmenden Feedbacks. Die niedrigste Übereinstimmung von Trainer und System ist hingegen mit 60% in Kategorie 1 zu finden. Kategorie 3 weist eine Übereinstimmung von 61,8% auf. 71,2% der Rückmeldungen in Kategorie 2 stimmen überein.

Die Übereinstimmungen unter den verschiedenen Umständen der Aufnahme liegen bei 75% bei Regen, 71,8% in der Halle und 64,9% bei Sonnenschein.

Die Auswertung der Kategorie ist in Abbildung 6.5 zu sehen.

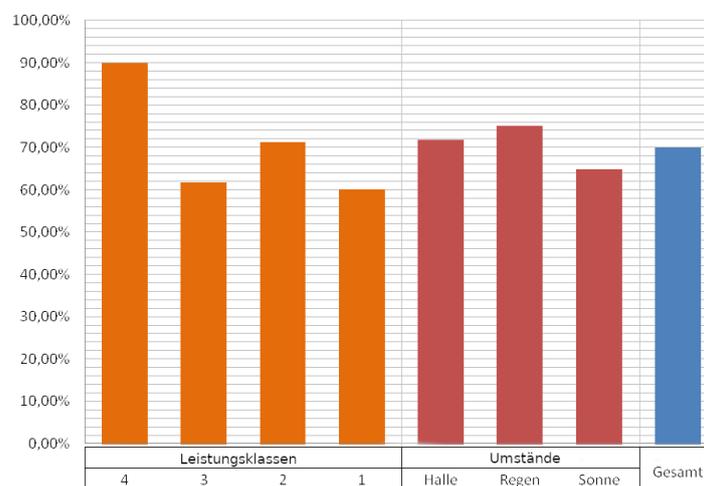


Abbildung 6.5: Übereinstimmendes Feedback von System und Trainer

Systemeinschätzung übertrifft Trainer

Ausgehend von den beiden ersten Kategorien erfasst die Kategorie *Systemeinschätzung übertrifft Trainer* den Anteil der nicht übereinstimmenden, durch das System allerdings korrekt erkannten Einschätzungen. Der durchschnittliche Anteil der Aufnahmen die in diese Kategorie fallen liegt bei **14,3%**.

Besonders auffällig ist ein Anteil von 26,5% in Leistungsklasse 3. In Leistungsklasse 4 liegt der Anteil der Aufnahmen die vom System besser als vom Trainer eingeschätzt werden bei 10% in Leistungsklasse 2 bei 12,1%. Am seltensten übertrifft das System den Trainer in Leistungsklasse 1 mit einem Anteil von 5%.

Der Anteil der den Trainer übertreffenden Rückmeldungen aufgeteilt nach Umständen weist nur geringe Unterschiede auf. Aufnahmen in der Halle haben einen Anteil von 15,4%, bei Sonne einen Anteil von 15,8% und bei Regen einen Anteil von 11,4%.

Abbildung 6.6 visualisiert die Auswertungen dieser Kategorie.

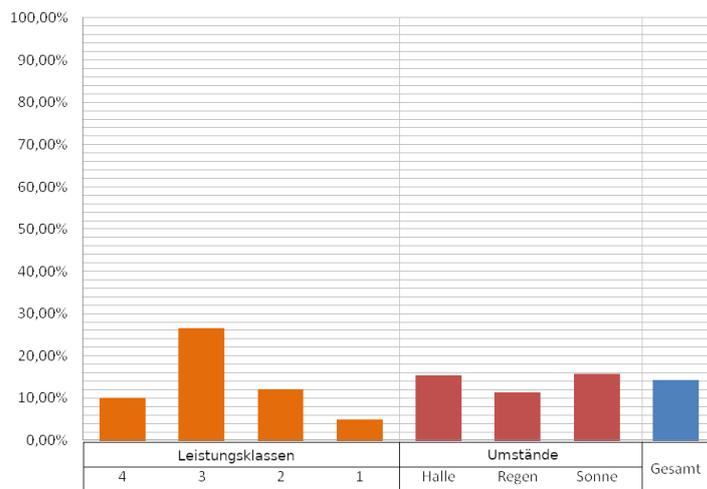


Abbildung 6.6: Feedback des Systems übertrifft das des Trainers

Fehlerhaftes Feedback

Unter die Kategorie *fehlerhaftes Feedback* fallen die durch das System falsch eingeschätzten Aufnahmen. Diese machen insgesamt einen Anteil von **17,1%** aus.

Der niedrigste Anteil fehlerhaften Feedbacks ist in Leistungsklasse 4 mit 0% zu finden. Das meiste fehlerhafte Feedback findet sich in Leistungsklasse 1 mit 35%. Dazwischen liegen Leistungsklasse 2 mit 19,7% und Klasse 3 mit 11,8%.

Bei der Aufteilung nach Umständen weisen 24,6% der Aufnahmen bei Sonne fehlerhaftes Feedback auf. Bei Regen sind es 13,6% und in der Halle 10,3% der Aufnahmen (siehe Abbildung 6.7).

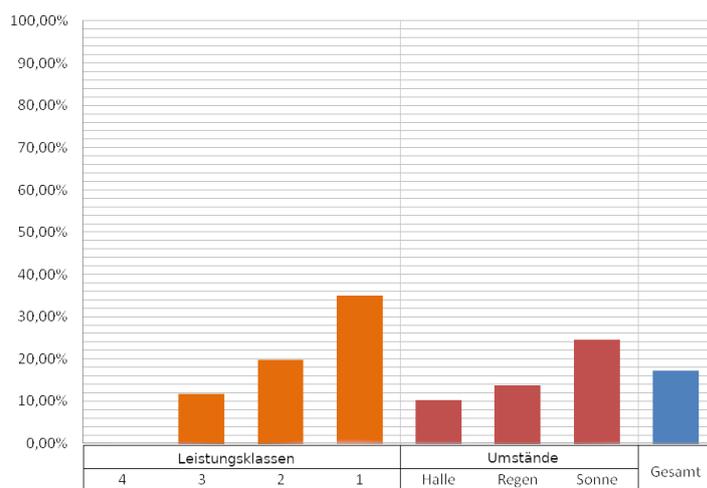


Abbildung 6.7: Fehlerhaftes Feedback des Systems

Die fehlerhaften Rückmeldungen des Systems lassen sich zusätzlich in Unterkategorien einteilen:

Fehler klar zu erkennen

Einige Fehleinschätzungen durch das System lassen sich leicht als solche identifizieren. Das liegt zum einen daran, dass die Ausführung des Sportlers grob fehlerhaft ist und eine Erkennung durch das System aus diesem Grund nicht möglich ist. In diesem Fall lässt sich der fehlerhafte Bewegungsablauf durch den Trainer einfach und ohne Hilfsmittel feststellen. Etwa 37,5% der Fehler können dieser Kategorie zugeordnet werden. Dies ist zum Beispiel bei den Anfängern in Leistungsklasse 1 mit einem Anteil von 42,9% ein häufig auftretender Grund. Zum anderen kommt es vor, dass das System einen groben nicht aufgetretenen Fehler vorhersagt.

Fehlerhaftes Feedback bei Probanden der Leistungsklasse 3 lässt sich mit einem Anteil von 75% besonders häufig auf diesen Grund zurück führen. Fehlerhaftes Feedback der Leistungsklasse 2 besteht zu 42,9% aus dieser Art Fehler. Bei Sonne waren 57,1% der Fehler auf diese Begründung zurückzuführen, bei Regen 16,7% und in der Halle 0%.

Warnmeldungen

In einigen Fällen werden Einschätzungen des Bewegungsablaufs mit Warnmeldungen versehen, die den Nutzer darauf aufmerksam machen, dass die Erkennung unter Umständen fehlerhaft sein könnte (siehe Kapitel 4). In diesen Fällen ist es dadurch möglich, fehlerhafte Rückmeldungen leicht zu identifizieren. Dies sind insgesamt 16,7% aller Fehler.

In diese Kategorie fallen 23,1% der fehlerhaften Rückmeldungen für Probanden der Leistungsklasse 2 und 14,3% der Leistungsklasse 1. In Leistungsklasse 3 ist keiner der fehlerhaften Rückmeldungen in diese Kategorie einzuordnen. In der Halle fallen 50% der Fehlermeldung in diese Kategorie, bei Regen sind es 16,7% und bei Sonne 7,1% .

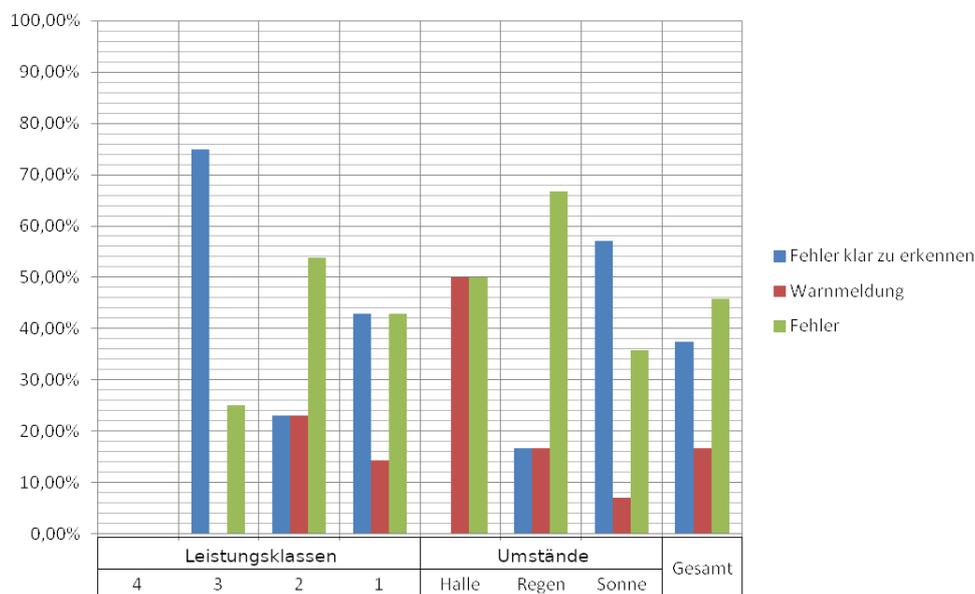


Abbildung 6.8: Zusammensetzung des fehlerhaften Feedbacks

Fehler

Die letzte Unterkategorie des fehlerhaften Feedbacks sind Fehler des Systems, die schwer als solche zu identifizieren sind und aus diesem Grund einen falschen Eindruck des Bewegungsablaufs verursachen können. Insgesamt sind dies 45,8% aller fehlerhaften Rückmeldungen, was 7,9% aller Rückmeldungen entspricht.

42,9% der fehlerhaften Rückmeldungen für Probanden der Leistungsklasse 1 fallen in diese Kategorie. In Leistungsklasse 2 sind es 53,9% und in Leistungsklasse 3 sind es 25%. Bei Probanden, deren Leistungen

in der Halle aufgenommen wurden, lag der Anteil des fehlerhaften Feedbacks in dieser Kategorie bei 50%, bei Aufnahmen bei Regen bei 66,7% und bei Sonne 45,8%.

6.2.2 Analyse

Im Folgenden werden die zuvor vorgestellten Ergebnisse analysiert. Damit soll die Nutzung durch Sportler verschiedener Leistungsklassen und unter verschiedenen Umständen betrachtet werden, um geeignete und ungeeignete Anwendungsfälle zu identifizieren. Anschließend wird auf die Rückmeldung der Nutzer eingegangen.

Leistungsklassen

Leistungsklasse 4

Die Aufnahmen dieser Leistungsklasse weisen mit 90% den höchsten Anteil an übereinstimmendem Feedback mit dem Trainer auf (siehe Abbildung 6.5). Das lässt sich dadurch erklären, dass diese Probanden in den meisten Fällen klare und technisch saubere Bewegungen ausführen. Die klare Bewegungsausführung macht es außerdem für das System leicht die relevanten Zeitpunkte zu identifizieren, weshalb der Anteil der korrekten Rückmeldungen durch das System bei 100% liegt. Der Trainer wurde folglich in 10% der Fälle bei der Einschätzung übertroffen.

Aufgrund der hohen Übereinstimmung von Trainer und System sowie der hohen Korrektheit der Einschätzungen des Systems eignet es sich bei Sportlern dieser Leistungsklasse. Dabei ist zusätzlich zur Nutzung durch den Trainer auch die Verwendung für Ausführungen, bei denen der Trainer nicht anwesend ist, denkbar.

Leistungsklasse 3

Mit 61,8% ist der Anteil der Übereinstimmung von Trainer und System der zweitschlechteste aller Leistungsklassen und deutlich geringer als die Übereinstimmungen in den Klassen 4 und 2 (siehe Abbildung 6.5). Der hohe Anteil lässt sich mit der hohen Quote der den Trainer übertreffenden Einschätzungen von 26,5% begründen. Diese Quote ist mit Abstand die Höchste aller Leistungsklassen in dieser Kategorie (siehe Abbildung 6.6). Grund dafür ist, dass der Bewegungsablauf der Probanden dieser Klasse sehr gut ist und vor allem an Kleinigkeiten gearbeitet werden muss. Diese lassen sich aufgrund der teilweise sehr kleinen, schnellen und schwer zu sehenden Bewegungen ohne Hilfsmittel häufig schwer entdecken (siehe Abbildung 6.4). Die Korrektheit der Aussagen des Systems liegt mit 88,2% für die Nutzung als unterstützendes Hilfsmittel des Trainers ausreichend hoch. Zusätzlich spricht für diese Einschätzung, dass 75% der Fehler des Systems durch Trainer leicht als solche zu identifizieren sind, da es sich dabei um grobe Fehler des Systems handelt. 25% der Fehler sind nicht problemlos als solche zu identifizieren, diese machen einen Anteil von 2,9% auf den Aufnahmen dieser Leistungsklasse aus (siehe Abbildung 6.8).

Das System ist in dieser Leistungsklasse für die Anwendung durch den Trainer als Hilfsmittel geeignet. Es bietet einen Mehrwert zu den bisher genutzten Mitteln, vor allem in der in dieser Leistungsklasse nötigen genaueren Betrachtung dezenter Bewegungen. Von einer Nutzung durch Sportler ohne Trainer ist aufgrund der Fehlerquote von 11,8%, die durch den Sportler alleine nicht immer überprüft werden kann, in dieser Leistungsklasse abzuraten.

Leistungsklasse 2

Der Anteil der Übereinstimmungen von Trainer und System ist mit 71,2% der zweithöchste aller Leistungsklassen (siehe Abbildung 6.5). In dieser Leistungsklasse sind Fehler durch Sportler deutlich leichter durch den Trainer zu identifizieren als die in Leistungsklasse 3. Trotzdem ist der grobe Bewegungsablauf den Probanden bereits geläufig, sodass dieser in seiner Durchführung klar ist. Aus diesem Grund

ist der Anteil der korrekten Einschätzungen mit 80,3% nur unwesentlich schlechter als in Leistungsklasse 3 (siehe Abbildung 6.4). Allerdings übertrifft das System – aufgrund der leichter erkennbaren Bewegungsabläufe – die Einschätzung der Trainer mit einem Anteil von 12,1% deutlich seltener als in Leistungsklasse 3 (siehe Abbildungen 6.4 und 6.6). Auch ist der Anteil der Systemfehler, die schwer als solche zu identifizieren sind, mit 53,9% aller Fehler – also 10,6% aller Aufnahmen der Leistungsklasse – deutlich höher als in Leistungsklasse 3 (siehe Abbildung 6.8). Der hohe Fehleranteil mit Warnmeldungen ist auf den in vielen Fällen wenig bis gar nicht vorhandenen Hüfteinsatz der Probanden dieser Leistungsklasse zurückzuführen.

Das System kann in dieser Leistungsklasse als Hilfsmittel durch einen Trainer verwendet werden. Allerdings bietet es einen deutlich geringeren Mehrwert als in der vorherigen Leistungsklasse. Aufgrund der recht groben Bewegungsabläufe und den zur Leistungssteigerung nötigen grundlegenden Verbesserungen im Bewegungsablauf, für die das System jedoch nicht benötigt wird, wird es nicht zwangsläufig als Hilfsmittel gebraucht.

Leistungsklasse 1

Mit 65% liegt die Korrektheit des Systems in dieser Gruppe weit unter dem Durchschnitt (siehe Abbildung 6.4). Ein unklarer, unsauberer Bewegungsablauf der Probanden macht es dem System schwer, die korrekten Zeitpunkte zu identifizieren. Darauf lässt sich auch die niedrige Übereinstimmung von Trainer und System zurückführen. Durch die unsauberen Ausführungen lassen sich vor allem Fehler, die einen korrekten Bewegungsablauf vorhersagen, als falsch identifizieren. Rückmeldungen, die nicht in diese Kategorie fallen und keine Warnmeldungen beinhalten, sind schwer einzuordnen und bilden mit 15% aller Aufnahmen dieser Klasse den höchsten Anteil.

Eine Nutzung des Systems bei Anfängern ist aus diesen Gründen nicht zu empfehlen. Allerdings sind die Bewegungsabläufe aufgrund der sehr großen Fehler durch den Trainer leicht und ohne Hilfsmittel zu bewerten. Außerdem ist die Verfeinerung der Wurftechnik, ohne dass ein grober Bewegungsablauf (siehe Leistungsklasse 2) erkennbar ist, in dieser Leistungsklasse nicht zielführend.

Umstände

Betrachtet man die Umstände der Aufnahmen, so fällt auf, dass der Anteil von übereinstimmendem, korrektem und übertreffendem Feedback zwischen den Kategorien nur wenig Unterschied besitzt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Umständen lassen sich zusätzlich auf die unterschiedlichen durchschnittlichen Leistungsniveaus pro Umstand zurückführen. So haben gewertete Probanden in der Halle eine durchschnittliche Leistungsklasse von 3, Probanden bei Regen eine von ungefähr 2,23 und diejenigen, die bei Sonne aufgenommen wurden, eine von 2,08. Die in Abbildung 6.4 zu sehende Verteilung des korrekten Feedbacks lässt dabei Zusammenhänge zwischen dem durchschnittlichen Leistungsniveau und der Korrektheit der Rückmeldungen erkennen. Der Vergleich der Aufnahmen der drei Probanden, von denen Aufnahmen in der Halle sowie im Freien existieren, ergab eine Übereinstimmung des korrekten Feedbacks von 96,6% sowie eine von 93,1% bei übereinstimmendem Feedback von System und Trainer.

Daraus lässt sich schließen, dass die Umstände der Nutzung des Systems für die Qualität der Rückmeldungen durch das System nicht relevant sind.

Auffälligkeiten

Trotz eines Bewegungsablaufs, dessen Grundform von allen Probanden, die sie beherrschen (Leistungsklassen 2, 3 und 4), gleichermaßen ausgeführt wird, sind teilweise Eigenarten bei der Ausführung durch die Sportler zu erkennen. Diese sind meist unproblematisch für die Erkennung durch das System und sind selten Teil eines bewegungstechnischen Fehlers. Trotz allem kann es in einigen Fällen dazu kom-

men, dass aufgrund dieser Eigenheiten die Bewegungen einiger Sportler in ihren Leistungsklassen unterdurchschnittlich oft korrekt analysiert werden. Daher ist eine an den Sportler angepasste Verfeinerung des Modells mithilfe maschinellen Lernens eine mögliche, zukünftige Entwicklung für die Verbesserung des Systems.

Die korrekte Anbringung des Hüftsensors gestaltete sich als nicht nutzerfreundlich. Aus diesem Grund mussten 10 Aufnahmen verworfen werden. Die provisorische Anbringung mit Hilfe von Sicherheitsnadeln und einem Gummiband um die Hüfte stellte sich bei der Nutzung des Systems während der Evaluation als ausreichend dar, muss aber für eine alltagstaugliche Befestigung überarbeitet werden. Damit könnten falsche Anbringungen und dadurch verursachte fehlerhafte Erkennungen, Analysen und Rückmeldungen durch das System verringert werden.

Die Nutzung des Systems durch Linkshänder (siehe Kapitel 6.1) weist keine Unterschiede im Vergleich zu rechtshändigen Werfern auf.

Nutzerfeedback

Bei den Rückmeldungen der Probanden und Trainer stieß das System auf viel Zuspruch. Für viele der Probanden bestätigte es bekannte Schwachpunkte und half ihnen dabei, sich die genaue Abfolge und zugehörigen Zeitpunkte besser vorstellen zu können. Vor allem eine Kombination mit dem im Training bereits gegebenen Videofeedback (siehe Kapitel 3) wurde als hilfreich erachtet. Die Betrachtung des Verhältnisses von Impuls- und Stemmschritt wurde in einigen Fällen gewünscht und aus diesem Grund nach der Evaluation dem System hinzugefügt. Das Anlegen und Tragen der Sensoren wurde als nicht störend wahrgenommen, allerdings wurde eine einfacher zu tragende und weniger fehleranfällige Befestigung der Sensoren an der Hüfte gewünscht. Aufnahme und Auswertung der Bewegungsabläufe waren zudem unkompliziert und – mit einer Auswertungszeit von unter fünf Sekunden in Google Colaboratory² – schnell möglich. Damit steht einem Einsatz des Systems zur Analyse in beinahe Echtzeit im Trainings- und Wettkampfalltag nichts im Wege.

6.3 Zusammenfassung

Die Nutzung des Systems eignet sich vor allem bei Sportlern, die den groben Bewegungsablauf gut beherrschen. Bei Anfängern ist die Rückmeldung durch das System hingegen teilweise fehlerhaft. Jedoch liegt im Training von Anfängern noch kein Fokus auf der Feinabstimmung der Bewegungen, weshalb das System dort nicht benötigt wird. Zur Leistungssteigerung bei Sportlern, die die Grobform der Bewegung bereits beherrschen, kann das System genutzt werden, es bietet jedoch nicht zwangsläufig einen Mehrwert und die Rückmeldungen des Systems sollten vom Trainer überprüft werden. Bei Sportlern, die die Feinform beherrschen, bietet das System einen deutlichen Mehrwert bei der Feinabstimmung der Bewegung. Kaderathleten und andere Sportler, die die Bewegung sehr gut beherrschen, können das System zusätzlich in Situationen nutzen, in denen kein Trainer verfügbar ist.

Das System ist an sämtlichen Nutzungsorten des Trainings- und Wettkampfalltags gleichermaßen gut zu nutzen und damit nicht abhängig von den herrschenden Umständen. Ebenso wenig beeinflusst die Wurfhand der Sportler die Genauigkeit des Systems. Trotzdem ist aufgrund der zum Teil vorhandenen kleinen Eigenheiten der Sportler eine zukünftige, an den jeweiligen Sportler angepasste Verfeinerung des Modells mithilfe von maschinellem Lernen denkbar. Des Weiteren benötigt es in Zukunft für das Tragen der IMU an der Hüfte eine weniger fehleranfällige und einfacher zu befestigende Option. Dies würde Nutzbarkeit und Genauigkeit des gesamten Systems erhöhen.

Die Rückmeldungen durch das System wurde von den Probanden und Trainern durchweg als positiv und hilfreich sowie als neuer Blickwinkel auf die Wurfbewegung bezeichnet. Ein Einsatz des Systems zur

² <https://colab.research.google.com/> – zuletzt aufgerufen am 22.5.2021

Analyse der Bewegung in beinahe Echtzeit ist aufgrund der einfachen Handhabung sowie der schnellen Auswertung der Daten möglich.



7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Möglichkeiten und Grenzen sensorbasierter automatisierter Analysetools im Speerwurf untersucht, die übertragbar auf ähnliche Wurfbewegungen sind. Ziel war es, eine einfach zu bedienende Möglichkeit zu schaffen, Trainer und Sportler situations- und ortsunabhängig in nahezu Echtzeit bei der Bewegungsanalyse zu unterstützen. Dazu wurde ein System entworfen, das mit Hilfe von am Körper getragenen IMUs den Bewegungsablauf eines Speerwerfers erkennt. Die zu betrachtenden Teilbewegungen, die Anbringungsorte der Sensoren sowie die zur Erkennung der Zeitpunkte zu analysierenden Parameter der IMUs wurden hierfür zusammen mit Speerwurf-Trainern und mit Hilfe von Testaufnahmen erarbeitet.

Das finale System besteht aus vier IMUs, die an den Fußgelenken beider Beine, dem Handgelenk des Wurfarms und vor dem Hüftknochen auf der Seite der Wurfhand befestigt sind. Die Aufnahme der Sensordaten erfolgt mittels Android-App. Die Verarbeitung und Auswertung der Daten ist in Python innerhalb eines Jupyter Notebooks implementiert. Eine Anbindung zum Integrieren des Python-Codes in die App wurde mittels Chaquopy geschaffen. Um die Zeitpunkte der Teilbewegungen zu identifizieren, werden die Daten der Beschleunigungssensoren der IMUs betrachtet. Die somit identifizierten Zeitpunkte des Bewegungsablaufs werden anschließend auf ihre richtige Abfolge untersucht. Daraus ergibt sich eine Einschätzung des Bewegungsablaufs durch das System, die pro Athlet pro Tag innerhalb einer CSV-Datei gespeichert wird.

Um die Einschätzungen des Systems zu evaluieren, wurden je fünf Würfe von insgesamt 31 Probanden unterschiedlicher Leistungsklassen unter verschiedenen äußeren Rahmenbedingungen analysiert. Diese wurden mit den Einschätzungen der Trainer vor Ort verglichen und mit Hilfe von Videoaufnahmen der Würfe, zusammen mit den Trainern, auf Korrektheit untersucht.

7.2 Ergebnisse

Die Rückmeldungen durch das System, welches unabhängig von äußeren Randbedingungen wie Ort und Witterung genutzt werden kann, erweisen sich als hilfreiche und verständliche Unterstützung im Trainingsalltag. Je genauer die Ausführung der Bewegung, desto exakter werden die einzelnen Phasen des Bewegungsablaufs erkannt. Die Qualität der Rückmeldungen durch das System steigt somit mit der Leistungsklasse der Athleten. Bei sehr guten Sportlern ist aufgrund der hohen Korrektheit der Systemrückmeldungen sogar eine Nutzung ohne Anwesenheit eines Trainers möglich. Bei Sportlern, die mindestens die Grobform des Bewegungsablaufs beherrschen, liefert eine Anwendung des Systems dem Trainer ebenfalls eine hilfreiche ergänzende Einschätzung des Bewegungsablaufs. Vor allem bei Sportlern, die an den Feinheiten des Bewegungsablaufs arbeiten, bietet die Einschätzung durch das System eine gute Ergänzung zu der des Trainers, da das System in einigen Fällen Fehler identifizieren kann, die professionellen Trainern nicht direkt auffallen. Bei Anfängern sind die Bewegungsphasen in vielen Fällen nicht eindeutig genug, um ein sinnvolles und korrektes Feedback des Systems zu ermöglichen. Jedoch sind Fehler in dieser Leistungsklasse grobe und grundsätzliche Fehler, für deren Analyse keine besonderen Hilfsmittel vonnöten sind.

Obwohl der allgemeine Bewegungsablauf einer gewissen Grundstruktur folgt, haben in seltenen Fällen unvorhersehbare Eigenheiten einzelner Sportler schlechtere Einschätzungen zur Folge. Zusätzlich sorgt die genutzte Befestigungsmethode des Hüftsensors für teils fehlerhafte Aufnahmen aufgrund ungeeigneter Befestigungen durch die Sportler.

7.3 Zukünftige Arbeiten

Auf Grundlage der Ergebnisse sind zahlreiche zukünftige Maßnahmen zur Anpassung und Verbesserung bestehender Konzepte sowie zur Erweiterung des Systems um neue Funktionen denkbar.

Die zurzeit verwendete Befestigung des Hüftsensors führt in einigen Fällen zu einem zu locker sitzenden Sensor, der für fehlerhafte Aufnahmedaten sorgt und damit die Auswertung durch das System verfälscht. Deshalb sollte zukünftig eine nutzerfreundlichere Methode zur korrekten und stabilen Befestigung des Hüftsensors entwickelt werden. Ebenfalls für fehlerhafte Auswertungen sorgen in wenigen Fällen Eigenheiten im Bewegungsablauf der Sportler. Um diese individuellen Eigenheiten zu berücksichtigen, könnte zusätzlich maschinelles Lernen zur Erstellung personalisierter Modelle für einzelne Sportler Verwendung finden. Für einen praktischen Einsatz des Systems im Trainings- und Wettkampfalltag wäre die Durchführung der Analyse zusammen mit einer nutzerfreundlichen Darstellung der Auswertungsergebnisse innerhalb der App notwendig. Bereits eingesetzte Methoden und Thresholds des bestehenden Systems könnten darüber hinaus anhand weiterer Evaluationsdaten zusätzlicher Nutzer nochmals ausführlich überprüft und gegebenenfalls optimiert werden.

Eine denkbare nützliche Ergänzung des Funktionsumfangs ist das zusätzliche Aufnehmen und Abspielen von Videomaterial innerhalb der App, ähnlich zu bereits in der Praxis verwendeten Video-Apps. Damit würde sich die Möglichkeit bieten, aufgenommene und analysierte Sensordaten mit der dazugehörigen Videoaufnahme zu verknüpfen, um zu vom System erkannten Zeitpunkten des Bewegungsablaufs innerhalb des Videos springen zu können. Dadurch ließe sich die Rückmeldung des Systems einfacher prüfen und nachvollziehen. Auch könnten Trainer durch eine Verknüpfung der Video- und Sensordaten Korrekturen von falsch erkannten Zeitpunkten vornehmen. Diese korrigierten Daten könnten dann Grundlage für ein durch maschinelles Lernen angefertigtes personalisiertes Modell sein. Eine Simulation der Wurfweite innerhalb der App ist ebenfalls vorstellbar. Diese könnte ein Training an nicht für Speerwurf geeigneten Orten durch virtuelle Würfe ermöglichen. Der zur Simulation der Weite benötigte Abwurfwinkel des Speers könnte mit Hilfe der Video-Funktion identifiziert werden. Weiterhin ist eine Eingabemöglichkeit der gemessenen Wurfweite denkbar, um so Zusammenhänge zwischen erreichter Weite und Ausführung zu untersuchen. Eine Kombination mit der in [SNSK16] behandelten Betrachtung der Trajektorie des Speers – mit Hilfe einer in der Speerspitze verbauten IMU – ist ebenfalls eine Option. Zusätzlich zur Verbesserung der Speerwurftechnik durch die Bewegungsanalyse ist es möglich, die Erkenntnisse in weiteren Anwendungsbereichen zu nutzen. Zum Beispiel könnten sie dazu verwendet werden, ein System zu entwickeln, mit dessen Hilfe das Verletzungsrisiko der Speerwerfer auf Grundlage von Bewegungsabläufen und Geschwindigkeiten, die eine Überbelastung implizieren können, ermittelt und minimiert werden kann. Die Nutzung der Erkenntnisse für die Analyse ähnlicher translationaler Wurfbewegungen mit Anlauf ist außerdem denkbar.

Literaturverzeichnis

- [BHP18] Sara M. Brice, Matthew Hurley, and Elissa J. Phillips. Use of inertial measurement units for measuring torso and pelvis orientation, and shoulder–pelvis separation angle in the discus throw. *Int. J. Sport. Sci. Coach.*, 2018.
- [BMC⁺19] Kyle J. Boddy, Joseph A. Marsh, Alex Caravan, Kyle E. Lindley, John O. Scheffey, and Michael E. O’Connell. Exploring wearable sensors as an alternative to marker-based motion capture in the pitching delivery. *PeerJ*, 2019(1), 2019.
- [CBFV18] Valentina Camomilla, Elena Bergamini, Silvia Fantozzi, and Giuseppe Vannozzi. Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3), 2018.
- [CHN⁺12] Liming Chen, Jesse Hoey, Chris D. Nugent, Diane J. Cook, and Zhiwen Yu. Sensor-based activity recognition, 2012.
- [COZV17] Maria Cornacchia, Koray Ozcan, Yu Zheng, and Senem Velipasalar. A Survey on Activity Detection and Classification Using Wearable Sensors. *IEEE Sens. J.*, 17(2), 2017.
- [Dor19] Pascal Dornfeld. Entwicklung eines Systems für die Mobile Sensordatenerfassung zur Erkennung von Ganzkörpergesten in Echtzeit. page 53, 2019.
- [DP02] JP Durán Piqueras. Manual básico de atletismo, tomo ii lanzamientos. *España, Editado por la Real Federación Española de Atletismo*, 2002.
- [ER20] G. Elumalai and R. Ramakrishnan. A Novel Approach to Monitor and Maintain Database About Physiological Parameters of (Javelin) Athletes Using Internet of Things (IoT). *Wirel. Pers. Commun.*, 111(1):343–355, 2020.
- [GG20] Celal Gençoğlu and Hikmet Gümüş. Standing Handball Throwing Velocity Estimation with a Single Wrist-Mounted Inertial Sensor. *Ann. Appl. Sport Sci.*, 8(3):0–0, 2020.
- [GSL⁺06] Zhen Gao, Qunjun Song, Ming Liu, Jianhe Lei, Yong Yu, and Yunjian Ge. Research on a throwing multidimensional force sensing system for advanced training of shot-put athletes. In *Proc. IEEE ICIA 2006 - 2006 IEEE Int. Conf. Inf. Acquis.*, 2006.
- [GSX⁺07] Zhen Gao, Huanghuan Shen, Shuangwei Xie, Jianhe Lei, D. Zhang, and Yunjian Ge. Acquisition and recognition method of throwing information for shot-put athletes. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 4681 LNCS(60674060):1050–1058, 2007.
- [GZ14] Zhen Gao and Dan Zhang. Analysis, fabrication, and field test of an advanced embedded throwing electromechanical sensing system. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2014.
- [HA89] Mont Hubbard and Le Roy W. Alaways. Rapid and accurate estimation of release conditions in the javelin throw. *J. Biomech.*, 22(6-7), 1989.
- [HMZ⁺13] Fabian Hoflinger, Jorg Muller, Rui Zhang, Leonhard M. Reindl, and Wolfram Burgard. A wireless micro inertial measurement unit (IMU). *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62(9):2583–2595, 2013.
- [HR84] Mont Hubbard and Harrold J. Rust. Simulation of javelin flight using experimental aerodynamic data. *J. Biomech.*, 17(10):769–776, 1984.

-
- [Hub84] Mont Hubbard. Optimal javelin trajectories. *J. Biomech.*, 17(10):777–787, 1984.
- [KRS⁺11] Wolfgang Killing, Maria Ritschel, Peter Salzer, Jürgen Schult, Michael Deyhle, Regine Isele, Frank Lehmann, Marco Badura, Winfried Heinicke, and Frank Müller. *Jugendleichtathletik : offizieller Rahmentrainingsplan des Deutschen Leichtathletik-Verbandes für die Wurfdisziplinen im Aufbautraining*. Deutscher Leichtathletik-Verband, 2011.
- [KSK⁺10] Hideharu Koda, Koichi Sagawa, Kouta Kuroshima, Toshiaki Tsukamoto, Kazutaka Urita, and Yasuyuki Ishibashi. 3D measurement of forearm and upper arm during throwing motion using body mounted sensor. *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, 4(1):167–178, 2010.
- [LNL16] Ye Liu, Liqiang Nie, Li Liu, and David S. Rosenblum. From action to activity: Sensor-based activity recognition. *Neurocomputing*, 181:108–115, 2016.
- [LPL12] Óscar D. Lara, Alfredo J. Prez, Miguel A. Labrador, and Jos D. Posada. Centinela: A human activity recognition system based on acceleration and vital sign data. In *Pervasive Mob. Comput.*, 2012.
- [MP12] Ryan S. McGinnis and Noel C. Perkins. A highly miniaturized, wireless inertial measurement unit for characterizing the dynamics of pitched baseballs and softballs. *Sensors (Switzerland)*, 12(9):11933–11945, sep 2012.
- [Mül20] Alexander Josef Müller. Utilizing Time Series Classification in Mobile Complex Activity Recognition. 2020.
- [NBN⁺19] S. FA.Ahmad Noh, M. E. Baharudin, A. Mohd Nor, Mohd Sazli Saad, and Mohd Zakimi Zakaria. A review of motion capture systems for upper limb motion in throwing events: Inertial measurement unit. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 670(1), 2019.
- [SAŠČ18] Zlatko Saračević, Almir Atiković, Stanislav Stanko Štuhec, and Ivan Čuk. How kinematics influences shot put results in track and field of international level athletes (A case study). *J. Phys. Educ. Sport*, 18(1):512–516, 2018.
- [SBMS20] Sebastian D. Skejō, Jesper Bencke, Merete Møller, and Henrik Sørensen. Estimating throwing speed in handball using a wearable device. *Sensors (Switzerland)*, 20(17):1–8, 2020.
- [SJS13] Heiko K. Strüder, Ulrich Jonath, and Kai Scholz. *Leichtathletik : Trainings- und Bewegungswissenschaft ; Theorie und Praxis aller Disziplinen*. Sportverlag Strauß, 2013.
- [SNSK16] Olli Särkkä, Tuukka Nieminen, Saku Suuriniemi, and Lauri Kettunen. Augmented inertial measurements for analysis of javelin throwing mechanics. *Sport. Eng.*, 19(4):219–227, 2016.
- [WLS18] Ye Wang, Hua Li, and Gongbing Shan. Acquiring the distance data with inertial measurement unit in a wearable device for the training of hammer throwers. *Proc. - 14th Int. Conf. Comput. Intell. Secur. CIS 2018*, 8:492–495, 2018.
- [WLW⁺18] Ye Wang, Hua Li, Bingjun Wan, Xiang Zhang, and Gongbing Shan. Obtaining vital distances using wearable inertial measurement unit for real-time, biomechanical feedback training in hammer-throw. *Appl. Sci.*, 8(12), 2018.
- [Yu18] Bing Yu. The motor solutions of throws in sports. *Handb. Hum. Motion*, 2-3:1773–1786, 2018.