



MAGISTERARBEIT

Titel der Magisterarbeit

„Validierung des Positionserfassungssystems Ubisense“

Verfasser

Jaworski Daniel, Bakk. rer. nat.

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaft (Mag. rer. nat.)

Wien, im Oktober 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt: Magisterstudium Sportwissenschaft

Betreuer: Mag. Dr. Roland Leser

Kurzfassung

In dieser Studie wird die Genauigkeit des radiowellenbasierten Positionserfassungssystems des Herstellers Ubisense untersucht. Das Ziel war es, die Genauigkeit dieses Systems bei fußballspezifischen Bedingungen zu überprüfen. Als Studiendesign wurde jenes von Frencken, Lemmink und Delleman (2010) übernommen. Hierbei wurden vier verschiedene Laufparcours auf drei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen von den Probanden/innen durchlaufen. Als Referenz- bzw. Kontrollsystem diente die Laufzeiterfassung durch ein Lichtschrankensystem von Alge Timing bzw. eine Videoaufzeichnung. Bei den statischen Messungen lag der Fehler des Ubisense-Systems entlang der X-Achse bei 3 ± 1 cm und entlang der Y-Achse bei 2 ± 1 cm. Bei den dynamischen Messungen kommt es zu einer systematischen Unterschätzung des Laufweges (größter Fehler: -6,8 %). Dabei zeigt sich, dass sowohl die Laufgeschwindigkeit als auch die Stärke der Richtungsänderung Einfluss auf die Abweichung haben. Bei der Erfassung der Geschwindigkeit kommt es ebenfalls zu einer systematischen Unterschätzung der tatsächlichen Messgröße (größter Fehler: -7,4 %). Bei der Geschwindigkeitserfassung zeigt sich, dass nur die Laufgeschwindigkeit, aber nicht die Stärke der Richtungsänderung Einfluss auf die Abweichung haben. Das hier gewählte Studiendesign muss jedoch auch kritisch betrachtet werden. Der Vergleich eines vordefinierten Laufweges mit einem tatsächlich gelaufenen Weg bedarf sicherlich einer weiteren Verbesserung. Berücksichtigt man die Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Messungen lediglich die Rohdaten des Systems für weitere Berechnungen verwendet wurden, kann dem Ubisense-System eine ausreichend hohe Genauigkeit in diesem Einsatzgebiet zugesprochen werden.

Abstract

Within the following study, the accuracy of the radio frequency based LPM (local position measurement) detection system of the manufacturer Ubisense is analysed. The research objective was to verify the precision of this system in specific soccer movement conditions. The design of this study is adopted to Frencken, Lemmink and Delleman (2010). The subjects ran through four different courses on three different speed levels. A light barrier system of Alge Timing for runtime detection as well as video footage were used as a reference or control system. The static accuracy (SD of the mean) of Ubisense is along the x-axis at 3 ± 1 cm and along the y-axis at 2 ± 1 cm. Looking at the dynamic measurements, a systematic underestimation of the travel path (mean difference at most $-6,8\%$) was determined. It turns out that both, speed and intensity of the change in direction have an impact on deviation. When detecting the speed, it also leads to a systematic underestimation of the actual measured value (mean difference at most $-7,4\%$). The speed detection shows that, only the speed, but not the intensity of the change in direction has an impact on the deviation. However, the chosen design of research has to be observed critically. The comparison of a predefined travel path with the actual run path clearly needs further improvement. Nevertheless, when considering the fact that, during measurements only the raw data of the system was used for further calculations, a sufficiently high accuracy can be awarded to the Ubisense system this specific field of application.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Positionserfassungssysteme im Sport	10
2.1	GPS – Positionserfassungssysteme	10
2.2	Videobasierte Positionserfassungssysteme	12
2.3	Radiowellenbasierte Positionserfassungssysteme	13
3	Ubisense RTLS	16
3.1	UWB – Ultra-wideband	16
3.2	Hardware des Ubisense RTLS und Funktionsweise	19
3.2.1	Sensoren	19
3.2.2	Tags	21
4	Methodik	22
4.1	Probanden	22
4.2	Kalibrierung des Systems für die Validierung	22
4.3	Messaufbau für die Validierung	23
4.3.1	Laufparcours	24
4.4	Datenaufnahme	26
4.4.1	Ubisense-Positionsdaten	27
4.4.2	Erfassung der Kontrollzeit mittels Lichtschrankensystem	28
4.4.3	Videoaufnahme	28
4.5	Datenaufbereitung	28
4.6	Statistische Auswertung	32
5	Ergebnisse	35
5.1	Statische Messungen	35
5.2	Dynamische Messungen	35
5.2.1	5-m-Gerade	35
5.2.1.1	<i>Geschwindigkeit langsam</i>	36
5.2.1.2	<i>Geschwindigkeit Mittel</i>	39
5.2.1.3	<i>Geschwindigkeit schnell</i>	41
5.2.2	45°-Richtungswechsel	44
5.2.2.1	<i>Geschwindigkeit langsam</i>	45
5.2.2.2	<i>Geschwindigkeit mittel</i>	47
5.2.2.3	<i>Geschwindigkeit schnell</i>	50
5.2.3	90°-Richtungswechsel	53
5.2.3.1	<i>Geschwindigkeit langsam</i>	54
5.2.3.2	<i>Geschwindigkeit mittel</i>	56

5.2.3.3	<i>Geschwindigkeit schnell</i>	59
5.2.4	Langer Parcours mit 45° - und 90°-Richtungswechseln (25 m)	62
5.2.4.1	<i>Geschwindigkeit langsam</i>	62
5.2.4.2	<i>Geschwindigkeit mittel</i>	65
5.2.4.3	<i>Geschwindigkeit schnell</i>	68
5.3	Übersicht der Auswertungen von Laufweg und Geschwindigkeit	71
6	Zusammenfassung und Diskussion	75
7	Literaturverzeichnis	78
8	Abbildungsverzeichnis	81
9	Tabellenverzeichnis	83
Anhang: Lebenslauf		85

1 Einleitung

Der Positionserfassung im Bereich des Sports wird in der Sportwissenschaft ein hoher Stellenwert zugeschrieben. Für ein besseres Verständnis der Belastungsprofile, Bewegungsabläufe sowie des taktischen Verhaltens in diversen Sportarten sind die Positionsdaten der Sportler/innen von großer Bedeutung. Erst anhand dieser Daten können optimierte Trainingsmethoden und Spielanalysen erstellt werden. Um diese Daten zu erfassen stehen verschiedene Positionserfassungssysteme zur Verfügung, welche sich auf folgende Technologien stützen: GPS (global positioning system), videobasierte sowie radiowellenbasierte Systeme repräsentieren die aktuellen Technologien, die in Kapitel 2 genauer vorgestellt werden. Einen Überblick über die verschiedenen Systeme schaffen Carling, Bloomfield, Nelsen und Reilly (2008).

Die schnelle Entwicklung der Elektronik und Informatik der letzten Jahre ermöglicht eine immer genauere und detailliertere Positionserfassung. Der technologische Fortschritt muss jedoch auch kritisch betrachtet werden. Aktuelle Systeme liefern zwar eine große Menge an Daten für die Sportspielanalyse, jedoch gilt es, diese Daten auf Validität zu überprüfen. Für ältere Positionserfassungssysteme, die auf GPS bzw. Videotracking basieren, wurden bereits Analysen bezüglich ihrer Genauigkeit und Validität durchgeführt. Anhand dieser Studien wurde die Genauigkeit für GPS-basierte Systeme (Vickery et al., 2014; Varley, Fairweather & Aughey, 2012; Dogramaci, Watsford & Murphy, 2011; Coutts & Duffield, 2010; Portas, Harley, Barnes & Rush 2010; Randers et al. 2010; Portas, Rush, Barnes & Batterham, 2007 sowie Edgecomb & Norton, 2006) sowie Videotrackingssysteme (Siegle, Stevens & Lames, 2012; Randers et al., 2010; Di Salvo, Collings, McNeilly & Cardinale, 2006) bereits nachgewiesen. Diese Technologien sind bereits sowohl im Leistungssport als auch teilweise im Breitensport zahlreich im Einsatz und haben Funktionalität und Nutzen bewiesen. Radiowellenbasierte Systeme wurden in der Sportwissenschaft ebenfalls schon untersucht, jedoch stehen laut Leser, Schleindlhuber, Lyons und Baca (2014) umfassende Validierungsergebnisse noch aus. Die aktuellste Studie im Bereich der radiowellenbasierten Systeme ist ebenfalls jene von Leser et al. (2014) und bezieht sich auf die Genauigkeit von Ubisense bei basketballspezifischen Bedingungen. Hierbei wurden 13 männliche Basketballspieler mit Ubisense-Sendern ausgestattet. Ubisense zeichnete die Daten mit einer Frequenz von 4,17 Hz auf. Als Referenzsystem diente die Laufstreckenaufzeichnung mittels eines Distanzmessrads. Die Laufwege der Spieler wurden innerhalb eines Basketballfeldes aufgezeichnet. Die Größe des Basketballfeldes stellt zugleich beinahe den maximalen von Ubisense erfassbaren Messbereich dar und ist somit gut geeignet für die Ermittlung der Genauigkeit über den gesamten Messbereich. Hierbei wurde kein Unterschied in der Genauigkeit der Datenaufzeichnung in der Feldmitte oder am Feldrand festgestellt. Als beste Position für

die Ubisense-Sender wird der Kopf beschrieben. Die Abweichung des Positionserfassungssystems zum Referenzsystem beträgt im Mittel $3,45 \pm 1,99$ %. Diese Studie belegt eine ausreichende Genauigkeit für die Positionserfassung beim Basketball durch das Ubisense-System.

Rhodes, Mason, Perrat, Smith und Goosey-Tolfrey (2014) validierten ebenfalls das Ubisense-System. Hierbei wurde das System für den Einsatz beim rollstuhlbasierten Feldsport getestet. Dabei wurden Messungen bei statischen Bedingungen, bei konstanter Geschwindigkeit (Distanzmessungen), die Erfassung der Höchstgeschwindigkeit sowie Messungen unter variablen dynamischen Bedingungen durchgeführt. Insgesamt wurden an einem Rollstuhl neun Sender platziert, die mit drei unterschiedlichen Frequenzen (4, 8 und 16 Hz) arbeiteten. Während der jeweiligen Tests wurden die aufgezeichneten Positionsdaten der jeweiligen Abtastraten mit dem jeweiligen Referenzsystem verglichen. Der absolute Fehler bei den statischen Messungen lag zwischen 0,19 und 0,32 m. Bei der Aufzeichnung der Distanz zeigte sich die größte relative Abweichung (1,3 %) bei einer Abtastrate von 4 Hz. Aufnahmen mit 8 und 16 Hz zeigten hierbei signifikant kleinere Abweichungen (< 1 %). Die Autoren dieser Studie beurteilen das Ubisense-System mit der Abtastrate von 8 und 16 Hz als gültiges Mittel für die Positionserfassung bei rollstuhlbasierten Feldsportarten.

Eine weitere Untersuchung bezüglich der Genauigkeit eines radiowellenbasierten Positionserfassungssystems ist jene von Siegle, Stevens und Lames (2013). Sie untersuchten die Messgenauigkeit eines LPM (local position measurement) sowie videobasierten Systems. Als Referenz wurden hier Distanzmessungen mit einer LAVEG (Jenoptik)-Laserpistole herangezogen. Hierbei zeichnete das LPM-System die Positionsdaten mit einer Frequenz von 45 Hz auf. Um die beiden Positionserfassungssysteme jedoch aneinander anzugleichen, wurde die Aufnahmefrequenz auf 25 Hz beschränkt. Über die Platzierung der Sender findet man keine Angaben. Die Messungen ergaben, dass das radiowellenbasierte System mit einem RMSE (root mean square error) von 0,24 m genauere Ergebnisse lieferte als das videobasierte System mit RMSE 0,73 m. RMSE ist der mittlere quadratische Vorhersagefehler. Diese Maßzahl dient der Beurteilung der Prognosegüte, welche hohe Prognosefehler stärker gewichtet als kleine. Des Weiteren zeigte das videobasierte System ortsbedingte Unterschiede in der Genauigkeit, wobei das radiowellenbasierte System auf den verschiedenen Messpositionen keine Veränderung in der Genauigkeit aufwies. Einen großen Vorteil dieser Untersuchung stellt das Referenzsystem dar. Durch die Distanzmessungen mit der Laserpistole konnten hier die X- und Y-Positionsdaten der

Systeme direkt miteinander verglichen werden. Die Autoren belegen eine höhere Genauigkeit des radiowellenbasierten Systems als des videobasierten Systems.

Eine weitere Studie ist jene von Ogris, Leser, Horsak, Kornfeind, Heller und Baca (2012). Diese prüften die Messgenauigkeit des LPM (Inmotio Object Tracking, BV, Niederlande) Positionserfassungssystems mittels Vicon als Referenzsystem. Vicon zählt zu den videobasierten Erfassungssystemen, welches mit Infrarotkameras arbeitet. Bei dieser Untersuchung wurden die LPM-Sender jeweils links und rechts an der Schulter der Probanden mittels einer Weste angebracht. Das LPM-System zeichnete die Positionsdaten mit einer Frequenz von 45,45 Hz auf. Insgesamt wurden bei dieser Studie 276 Testläufe auf drei verschiedenen Parcours mit sechs unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Zusätzlich wurden zehn Kleinfeldspiele durchgeführt, um die Genauigkeit bei dynamischen Situationen zu erfassen. Bei den Positionsdaten lag die absolute Abweichung des radiowellenbasierten Systems im Mittel bei $23,4 \pm 20,7$ cm. Die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeiten zeigte eine Abweichung zwischen 0,01 und 0,23 km/h. Die maximale Abweichung bei der Geschwindigkeit lag bei 2,71 km/h. Zudem zeigte das LPM-System Unterschiede in der Genauigkeit in Bezug auf die momentane Bewegungsdynamik des Probanden. Die Genauigkeit nahm in den Randzonen des Observationsfeldes ab.

Frencken, Lemmink und Delleman (2010) führten eine Validierung des LPM Positionserfassungssystems (Inmotio Object Tracking, BV, Niederlande) bei einem fußballspezifischen Set-up durch. Die Aufzeichnungsrate des Systems lag bei 45 Hz. Hierbei wurde dem System bei statischen Messungen eine Abweichung von 1 cm bei Positionierung der Sender auf dem Spielfeld und von 2 bis 3 cm Abweichung beim Tragen der Sender auf den Probanden nachgewiesen. Bei dynamischen Messungen unterschätzt das LPM-System die tatsächliche Distanz um bis zu $-1,6\%$. Die vom LPM-System gemessene Geschwindigkeit ist signifikant und systematisch niedriger als die vom Referenzsystem ermittelte. Wobei sowohl die absoluten als auch relativen Differenzen klein sind, zwischen $-0,1$ km/h ($-1,3\%$) und $-0,6$ km/h ($-3,9\%$).

Die Validierung des Positionserfassungssystems Ubisense stellt das Ziel der vorliegenden Arbeit dar. In Anlehnung an die bereits von Frencken et al. (2010) durchgeführten Studie soll die Messgenauigkeit dieses Systems überprüft werden. Das gewählte Setup soll die Genauigkeit und Validität des Systems bei fußballcharakteristischen Bewegungsabläufen untersuchen. Hierbei werden wie bereits bei MacLeod, Morris, Nevill und Sunderland (2009), Di Salvo et al. (2006) sowie Frencken et al. (2010) vordefinierte Laufpfade verwendet, um die Genauigkeit des Positionserfassungssystems zu überprüfen. Auf die Problematik eines solchen Setups wird in Kapitel 6 genauer eingegangen.

Der erste Teil dieser Arbeit gliedert sich in die Einführung (Kapitel 2) über aktuelle Positionserfassungssysteme im Sport. Verschiedene Technologien werden hier vorgestellt und erläutert. Dabei soll eine aktuelle Übersicht über die erhältlichen Systeme geschaffen werden. Bezüglich der unterschiedlichen Trackingmethoden werden in diesem Teil der Arbeit die jeweiligen Vor- und Nachteile beschrieben.

Im zweiten Teil (Kapitel 3) wird speziell auf das System von Ubisense eingegangen. Die Funktionsweise des Systems soll hier nähergebracht und verschiedene technische Begriffe wie UWB (ultra-wideband) erklärt werden.

Der empirische Teil dieser Arbeit wird im dritten Teil behandelt. In Kapitel 4 wird auf die Methodik der empirischen Untersuchung eingegangen. Es wird Bezug genommen auf die verwendeten Systeme, Probanden, Messaufbauten sowie Einstellparameter. Abschließend folgen in diesem Kapitel Beschreibungen zum Messablauf, zur Datenaufnahme, zur Datenaufbereitung sowie statistischen Auswertung der Daten.

Die Ergebnisse der Validierung folgen in Kapitel 5. Hier werden die Ergebnisse der jeweiligen Geschwindigkeiten sowie Messaufbauten dargestellt. Die gewonnenen Daten werden sowohl tabellarisch als auch graphisch erläutert.

Im letzten Teil folgt eine Zusammenfassung dieser Untersuchung und die Ergebnisse werden abschließend diskutiert.

2 Positionserfassungssysteme im Sport

Das folgende Kapitel soll einen Einblick in die verschiedenen Methoden und Technologien zur Positionserfassung geben. Es wird auf Systeme eingegangen, die in der Sportwissenschaft zur Anwendung kommen. So schreiben Barris und Button (2008), dass es eine Reihe von Bewegungsaufzeichnungsmethoden gibt, welche nicht auf Videotechnik gestützt sind. Diese Methoden verwenden beispielsweise Technologien wie Infrarot, Ultraschall, magnetische Sensorik, radiofrequenzbasierte Systeme die Radiofrequenzidentifizierung (RFID) sowie IEEE 802.11. Im Bereich der Sportwissenschaft werden jedoch vorwiegend GPS, videobasierte Systeme sowie radiowellenbasierte Trackingsysteme verwendet. Um eine bessere Übersicht für diese Positionserfassungs- und Tracking-Technologien zu bekommen, werden diese Technologien in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.1 GPS – Positionserfassungssysteme

Hinter der gängigen Bezeichnung „GPS“ steht der Begriff des Global Positioning Systems. Die offizielle Bezeichnung hierfür ist NAVSTAR GPS und steht für „Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System“. Aus der Bezeichnung geht hervor, dass bei dieser Methode die Positionserfassung satellitenunterstützt erfolgt. Hierbei muss der GPS-Empfänger von dem/der Sportler/in am Körper getragen werden.



Abbildung 1: GPS-Empfänger von GPSports Systems

Quelle: Hardware – GPSports | Global Positioning Systems. Zugriff am 10.Juni 2015 unter <http://gpsports.com/spi-hpu/>

Das Tragen des Empfängers (Abbildung. 1) am Körper stellt gleichzeitig einen Nachteil dieser Technologie dar. Das Tragen zusätzlicher Masse in Form von Sensoren am Athleten kann ein mögliches Verletzungsrisiko darstellen. Weiters kann das Tragen des Empfängers den/die Spieler/in behindern und somit seine Leistung beeinflussen. Insbesondere bei Spilsportarten ist bei Verwendung von GPS Systemen ein Tragen des

Empfängers unumgänglich. Dieses Problem kann bei diversen Sportarten zumindest teilweise gelöst werden, indem der Empfänger unter bestimmten Bedingungen auf dem Sportgerät selbst befestigt werden kann. Für eine im Bereich der Sportwissenschaften ausreichend genaue Positionserfassung muss der Empfänger Signale von mindestens vier der erdumkreisenden Satelliten empfangen können. Die Notwendigkeit der Satellitensignale beschränkt die GPS-basierten Systeme zudem auf den Outdoor-Bereich. Anhand dieser Signale berechnet der Empfänger Geschwindigkeit, Distanz, zurückgelegte Strecke (Pfade) sowie den Höhenverlauf und kann diese Daten auch protokollieren. Diese Daten können aus dem Gerät ausgelesen und für Bewegungsanalysen herangezogen werden.

Die Messverfahren zur Positionsbestimmung mittels GPS wurden in den letzten Jahren weiter verbessert. Besonders die immer kompakteren Empfängereinheiten reduzieren die Beeinflussung des Sportlers/der Sportlerin.

Bezüglich der Genauigkeit sowie Validität dieser Systeme gibt es bereits einige Untersuchungen bei sportartenspezifischen Anwendungen. Einige Studien bezüglich der Positionsbestimmung mittels GPS wurden bereits in der Einleitung erwähnt. Diese Studien belegen den getesteten Systemen eine gute Genauigkeit für die Bestimmung von zurückgelegtem Weg und Geschwindigkeit. Bei kurzen Sprints (< 1 s), Läufen mit hoher Intensität und schnellen Richtungswechseln zeigen die Studien (Coutts & Duffield, 2010; Macleod et al., 2009; Portas et al., 2007) Abstriche in der Genauigkeit bei den GPS-Systemen. Der Grund hierfür wird der Abtastrate (eine Messung pro Sekunde, 1 Hz) dieser Systeme zugeschrieben. Aktuelle Systeme von GPSports arbeiten bereits mit einer Abtastrate von 15 Hz, um dieser Problematik entgegenzusteuern. Tabelle 1 bietet einen Überblick über aktuelle GPS-Systeme im Sport.

Tabelle 1: Überblick zu GPS-Systemen der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)

Hersteller	System	Homepage
GPSports	SPI HPU	www.gpsports.com
RealTrack Systems	Wimu	www.realtracksystems.com
Catapult Sports	OPTIMEYE S5	www.catapultsports.com
Redback Biotek	VX Sports GPS Tracking	www.redbackbiotek.com
Sports Performance Tracking	GameTraka	www.gametraka.com

2.2 Videobasierte Positionserfassungssysteme

Bei dieser Kategorie der Positionserfassungssysteme erfolgt die Positionserfassung videounterstützt. Anhand des Videomaterials können die Positionen der einzelnen Spieler/innen bestimmt werden. Aktuelle Systeme wie ProZone erfordern die permanente Installation von mehreren Kameras. Diese müssen an errechneten optimalen Stellen positioniert werden, um das gesamte Spielfeld abzudecken (Carling et al., 2008). Jede Kamera übernimmt dabei einen bestimmten Ausschnitt der Gesamtfläche. Die einzelnen Ausschnitte ergeben zusammengefügt ein zweidimensionales Abbild des Spielfeldes, auf dem folglich die Positionen der Spieler/-innen aufgezeichnet werden können.

Bei früheren Systemen, wie beispielsweise dem System von Reilly & Thomas (1976), mussten die bewegten Objekte im Video noch manuell erfasst und verfolgt werden. Laut Carling et al. (2008) war dieser manuelle Trackingvorgang sehr laborintensiv und somit meist nur auf Universitätsstudien beschränkt. Daher waren diese Systeme meist nur auf die Erfassung einzelner Spieler ausgelegt. Zusätzlich waren die Codierung, Analyse und Interpretation der Daten sehr zeitintensiv, die Ergebnisse waren erst mit mehrtägiger Verzögerung verfügbar. Diese Umstände führten zu einer eingeschränkten Akzeptanz bei den Anwendern (James, 2006). Durch die technologische Weiterentwicklung in den Bereichen Videotechnik, Computer, Hard- und Software sowie Elektronik ist es heutzutage bereits möglich, den Trackingprozess zum größten Teil automatisiert ablaufen zu lassen. Barris und Button (2008) berichten von einem automatischen Trackinganteil von 95 %. Die manuelle Eingabe sowie Korrekturen sind nur mehr bei problematischen Situationen notwendig. Manche Systeme sind bereits in der Lage, Echtzeitergebnisse zu liefern. So können beispielsweise aktuelle Systeme wie DatatraX oder TRACAB die Ergebnisse bereits während des Spiels anbieten. Die Verwendung von komplexen Trigonometrieverfahren, mathematischen Algorithmen, Bild-Objekt-Transformationsmethoden zur Berechnung von 2- oder 3-D-Raumkoordinaten wie beispielsweise DLT (Shiokawa, Takahashi & Kann, 2003) aus dem Videomaterial, diversen Bildverarbeitungstechniken sowie Filtertechniken machen es möglich, die Position der einzelnen Spieler zu erfassen (Carling et al., 2008). Das System von TRACAB ist mit zwei Kameraeinheiten zu jeweils acht Kameras (Abbildung 2) ausgestattet. Laut Hersteller basiert dieses System auf der sogenannten „stereo vision“-Technologie. Hierbei wird jeder Bereich des Spielfeldes von jeweils zwei Kameras abgedeckt. Dies eröffnet die Möglichkeit eines 3-D-Trackings in Echtzeit.

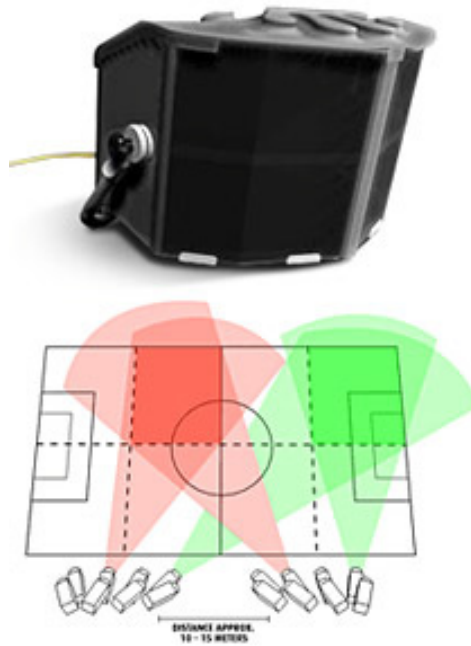


Abbildung 2: Kameraeinheit von TRACAB sowie „stereo vision“-Technology

Quelle: Our Technology | TRACAB. Zugriff am 10. Juli 2015 unter

<http://tracab.hegogroup.com/technology.aspx>

Videobasierte Systeme haben den großen Vorteil, dass die Sportler/-innen keine Geräte am Körper tragen müssen. Dies ist, gerade im Wettkampf, oft eine Bedingung, die im Reglement der jeweiligen Sportart eindeutig definiert ist. Somit stellen die videobasierten Systeme oft die einzige Möglichkeit dar, die Positionen und Wege der Spieler während des Wettkampfs zu erfassen. In Tabelle 2 erfolgt eine Übersicht über die aktuellen videobasierten Systeme.

Tabelle 2: Überblick zu Videobasierten Systemen der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)

Hersteller	System	Homepage
STATS LLC	prozone	www.prozonesports.com/
Feedback Sport	Feedback Football	www.feedbacksport.com
TRACAB (Hegogroup)	TRACAB	tracab.hegogroup.com

2.3 Radiowellenbasierte Positionserfassungssysteme

Die dritte große Gruppe der Positionserfassungssysteme bilden die radiowellenbasierten Systeme. LPM (local position measurement), LPS (local positioning system) und RTLS (real-time locating system) sind gängige Abkürzungen in diesem Bereich. In den letzten Jahren wurde gerade diesen Systemen im Bereich der Sportwissenschaft vermehrt

Beachtung geschenkt. Die von den Herstellern versprochene Genauigkeit, die Möglichkeit der Echtzeitanalyse und der reduzierte Zeitaufwand im Vergleich zu videobasierten Systemen sind die Hauptgründe dafür. Die Basis für diese Systeme ist die Verwendung von elektronischen Mikrosendern (Tags), die an jedem zu ortenden Objekt beziehungsweise an der zu ortenden Person angebracht werden müssen. Dies ist auch ein Nachteil, den diese Systeme mit den GPS-basierten Systemen gemeinsam haben. Der Vorteil gegenüber GPS ist, dass diese Systeme auch indoor einsetzbar sind. Die Ortung der Tags erfolgt in weiterer Folge mittels Funksendern und Empfangsgeräten, welche rund um das Spielfeld installiert werden. Somit bestehen diese Systeme aus den aktiven Tags, welche permanent ein Signal abgeben, und den passiven Empfangsgeräten, die diese Signale registrieren und weiterverarbeiten.

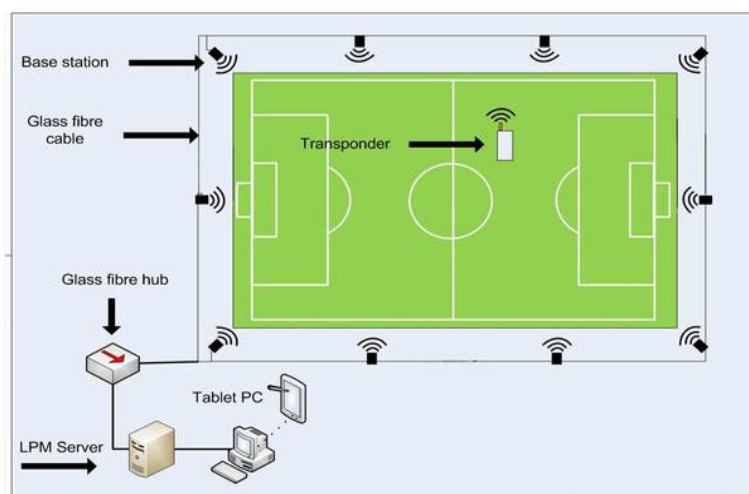


Abbildung 3: Funktionsprinzip motioTrac

Quelle: motioTrac Team Funktionsprinzip. Zugriff am 09.Juli.2015 unter <https://www.abatec-ag.com/inmotiotec-rtls/lpm-team/motiotrac-team/motiotrac-team-funktionsprinzip/>

Anhand der unterschiedlichen Laufzeiten des Signals zu den Empfängern kann die Position des Tags bestimmt werden. Diese Positionsdaten können je nach System dreidimensional und bis zu 1000 Mal pro Sekunde bei einer Genauigkeit im einstelligen Zentimeterbereich berechnet werden. Das System motioTrac von inmotiotec bietet eine Positionserfassung mit einer Auflösung von bis zu 1000 Hz. Der Hersteller schreibt bezüglich der Funktionsweise des Systems Folgendes (www.abatec-ag.com/inmotiotec-rtls, am 11.Juli 2015):

„Das fixinstallierte, lokale Positionsmesssystem (LPM System) der Firma inmotiotec liefert zentimetergenaues Datenmaterial und das bis zu 1.000 Mal in der Sekunde. Ob beim Sport, Wirtschaft, Entertainment oder in der Industrie: Das LPM System liefert stets zuverlässige Daten. Über einen Telemetrikkanal können zudem

Beschleunigung, Herzfrequenz, zurückgelegte Wege, Spielverhalten usw. angezeigt werden.“

Dieses System liefert ausführliche Informationen zur Leistung der einzelnen Spieler/innen. Informationen wie Trainingsbelastung und Bewegungsintensität, Bewegungsumfang und Schnelligkeit sowie taktisches Verhalten werden an den/die Benutzer/in geliefert. Die Genauigkeit des Systems wird von inmotiotec mit 5 bis 10 cm angegeben. Bezüglich der Genauigkeit und Validität dieses Systems gibt es bereits einige Studien (Siegle et al. 2013; Ogris et al. 2012; Frencken et al. 2010). Hierbei wird dem System eine Genauigkeit von 2 ± 1 cm bei statischen Bedingungen zugeschrieben (Frencken et al. 2010). Bei dynamischen Bedingungen unterschätzt das System den zurückgelegten Weg bei allen Teststrecken mit Richtungsänderungen, wobei der Fehler bei stärkerer Richtungsänderung und Länge der Teststrecke zunimmt.

Tabelle 3: Überblick zu Radiowellenbasierten Systeme der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)

Hersteller	System	Homepage
Fraunhofer Institut	RedFIR	www.iis.fraunhofer.de/
Inmotiotec GmbH	motioTrec	www.inmotiotec.com
Kinexon Sports & Media UG	Kinexon One	www.kinexon-sports.com
Zebra Technologies Corporation	DART UWB	www.zebra.com
ZXY Sport Tracking AS	ZXY	www.zxy.no
Ubisense Group	Ubisense RTLS	www.ubisense.net

3 Ubisense RTLS

In diesem Kapitel wird näher auf das Echtzeit-Ortungssystem RTLS (real-time location system) des Herstellers Ubisense eingegangen. Ubisense hat seine Hauptgeschäftsstelle in Cambridge, Großbritannien, und zählt laut eigenen Angaben derzeit zum führenden Anbieter für Ortungslösungen und raumbezogene Technologien. Das Echtzeit-Ortungssystem basiert auf der Ultrabreitband-Technologie (ultra-wideband, UWB), auf welche in Kapitel 3.2 genauer eingegangen wird. Neben den Ortungslösungen bietet das Unternehmen zusätzlich spezielle Softwarelösungen für unterschiedliche Einsatzgebiete an, um die RTLS-Daten in werthaltige und handlungsrelevante Informationen umzuwandeln.

Die Haupteinsatzgebiete der Ortungssysteme des Unternehmens sind laut Homepage (<http://ubisense.net/de>):

- Automotive
- Luftfahrt
- Fertigungsindustrie
- Transport
- Militär
- Telekommunikation
- Energie
- Forschung

Auf den Einsatz von RTLS-Systemen im Sport wird vom Hersteller nicht näher eingegangen. Das in dieser Arbeit verwendete Ubisense ist ein radiowellenbasiertes Echtzeit-Ortungssystem. Es erlaubt das Auffinden, Lokalisieren und Tracken von Objekten in Echtzeit und wird den LPS-Systemen zugeordnet. Lokale Positionserfassungssysteme können im Vergleich zu GPS-Systemen (global positioning system) nur bestimmte Bereiche abdecken. Sie kommen vorwiegend in Gebäuden bzw. an Orten zum Einsatz, an denen GPS-Systeme keine bzw. eingeschränkte Genauigkeit gewährleisten. Die genaue Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden stellt jedoch ein großes Problem dar, da es oft zu Reflexionen der Radiowellen kommt. Diesem Problem versucht Ubisense mit dem Einsatz der Ultrabreitband-Technologie entgegenzuwirken.

3.1 UWB – Ultra-wideband

Wie bereits erwähnt, basiert das System von Ubisense auf der Ultrabreitband-Technologie. Die UWB-Technik beschäftigt sich laut Eisenacher (2004) mit

Funkübertragungssystemen, deren Leistungsdichtespektrum unterhalb der von elektronischen Gebrauchsgeräten erzeugten Rauschleistungsdichte liegt. Abbildung 4 verdeutlicht das UWB-Prinzip im Frequenzbereich. Es wird ersichtlich, dass UWB mit einer sehr hohen Frequenzspreizung mit geringem Leistungsdichtespektrum arbeitet. Die Bandbreite von UWB-Signalen kann bis zu mehrere GHz betragen. Eisenacher (2004) schreibt, dass der Grundgedanke von UWB darin besteht, kein eigenes Frequenzband zu belegen, sondern als Overlay-System bereits vergebene Frequenzbänder erneut zu nutzen.

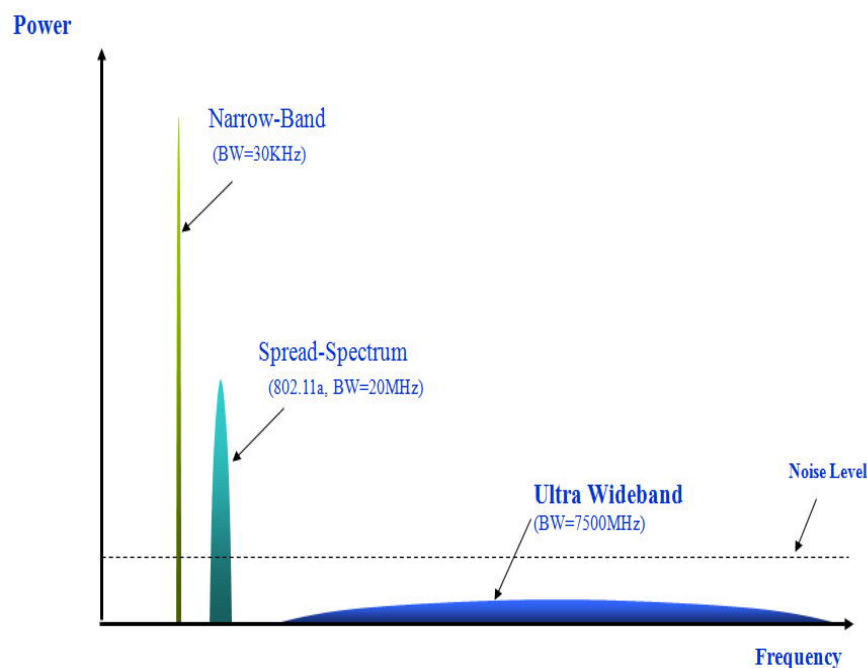


Abbildung 4: Das UWB-Prinzip

Quelle: What's UWB? – Global Interface Technologies. Zugriff am 06. Juli 2015 unter http://www.git-inc.com/uwb_e.html

Eine präzise Positionserfassung innerhalb von Gebäuden ist eine große Herausforderung. Die Ortungssysteme müssen hierbei zwischen direkt und indirekt empfangenen Signalen unterscheiden. Reflexionen der Signale können durch Wände, Decken, Böden usw. hervorgerufen werden. Bei herkömmlichen Radiofrequenzen kann es zu Überlagerungen der Signale kommen, dies führt zu großen Messfehlern von mehreren Metern (Abbildung 5).

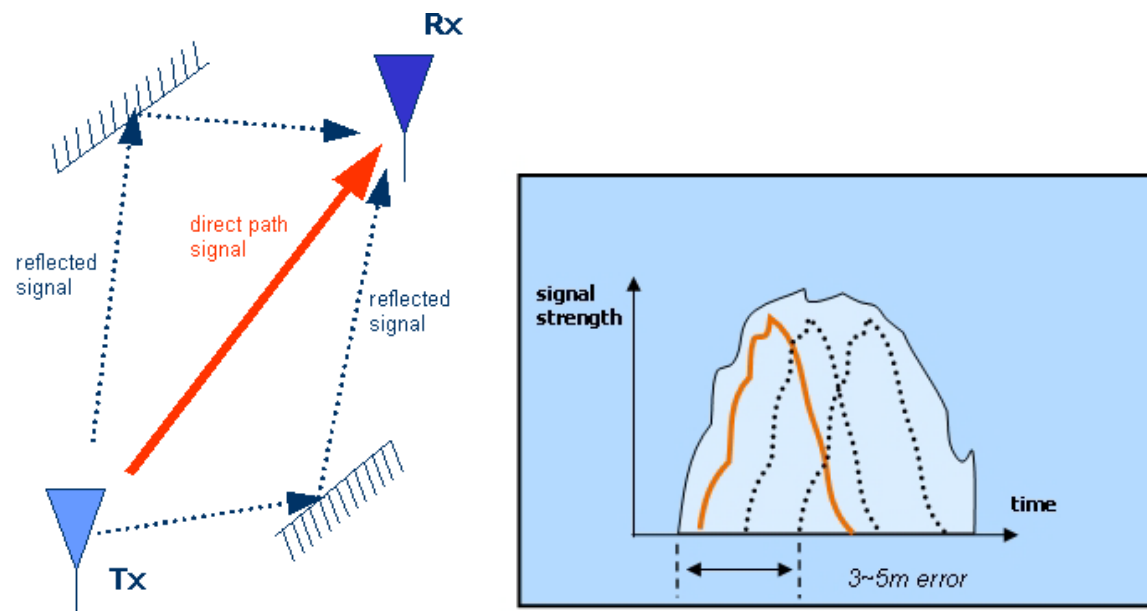


Abbildung 5: Überlagerung von reflektierten Signalen

Quelle: Ubisense im Überblick. Datenblatt 11/ 2006. Zugriff am 10.Mai 2014 unter www.aktiv-verzeichnis.de/anlagen/544/ubisense-informationen.pdf

Ein großer Vorteil der UWB-Technologie ist die Länge der gesendeten Impulse (~ 1 ns). Diese sehr kurze Impulsdauer der UWB-Systeme verringert das Risiko der Überlagerung durch Reflexionen, da der Impuls bereits zu Ende ist, bevor er überhaupt reflektiert werden kann. Die sehr kurze Impulsdauer (Abbildung 6) ermöglicht auch eine hohe Genauigkeit bei der TOA (time of arrival)-Messung der Signale.

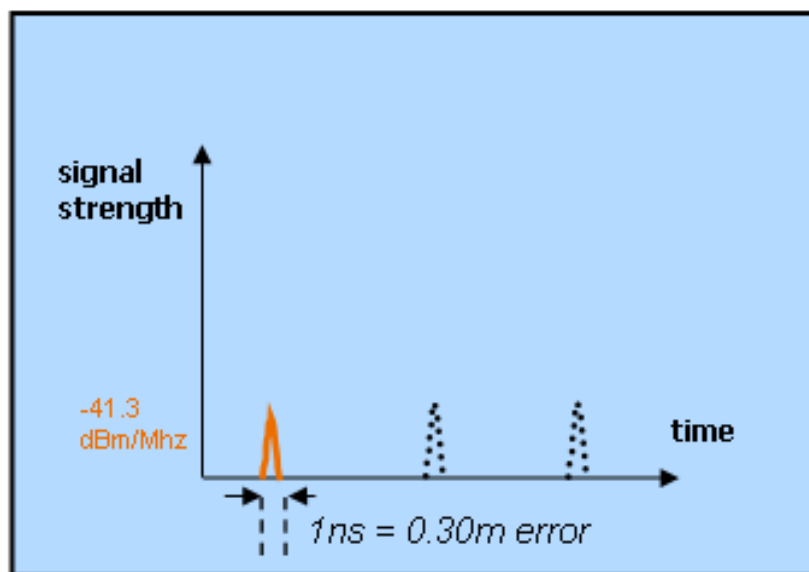


Abbildung 6: UWB-Impuls

Quelle: Ubisense im Überblick. Datenblatt 11/ 2006. Zugriff am 10.Mai 2014 unter www.aktiv-verzeichnis.de/anlagen/544/ubisense-informationen.pdf

Bezüglich der Genauigkeit von UWB-basierten Systemen schreiben Kolodziej und Hjelm (2006, S. 120):

"Most location -based positioning systems that use radio frequency-based technologies (i.e., Wi-Fi or Bluetooth) can pinpoint objects within 3 to 4m (10 to 16ft) without any additional computation. Systems that use UWB (i.e., Ubisense) can pinpoint and track to an accuracy of approximately 2m (6ft)."

Kontrovers zu Kolodziej und Hjelm sind die Herstellerangaben hinsichtlich der Genauigkeit. Laut Ubisense erreicht das RTLS eine Genauigkeit von 15 cm in der dreidimensionalen Positionsbestimmung.

3.2 Hardware des Ubisense RTLS und Funktionsweise

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise des für diese Arbeit verfügbaren Ubisense Systems näher gebracht. Die einzelnen Hardwarekomponenten wie Sensoren und Tags werden erläutert.

3.2.1 Sensoren

Die in Halle 6 des USZ 1 installierten Sensoren (Abbildung 7) haben die Aufgabe, die UWB-Signale der Tags zu erfassen sowie die Steuerung der Tags über die bidirektionale Kommunikation. Unter bidirektionaler Kommunikation versteht man, dass die Sensoren sowohl die UWB-Signale der Tags empfangen als auch den Tags via konventionelle Funkübertragung Informationen schicken können (Abbildung 8). Die Sensoren sind dabei so platziert, dass die Tags im gesamten Hallenbereich verfolgt werden können. Hierfür wurden sechs Sensoren im Hallenbereich installiert und mittels Netzkabel verbunden. Die Sensoren sind in Zellen organisiert, welche die berechneten Positionsdaten der Tags an die Ubisense-Softwareplattform senden. Die Zellen können in beliebiger Zahl aufgebaut werden, sodass beliebig große Flächen abgedeckt werden.



Abbildung 7: Ubisense Series 7000 Sensor

Quelle: Ubisense News Germany. Zugriff am 08. Juli 2015 unter <http://ubisensegermany.blogspot.co.at/>

Die empfangenen UWB-Signale werden in weiterer Folge zur Berechnung folgender Werte verwendet:

- AOA (angle of arrival): Eingangswinkel des UWB-Signals
- TOA (time of arrival): Zeitpunkt des Eintreffens des UWB-Signals

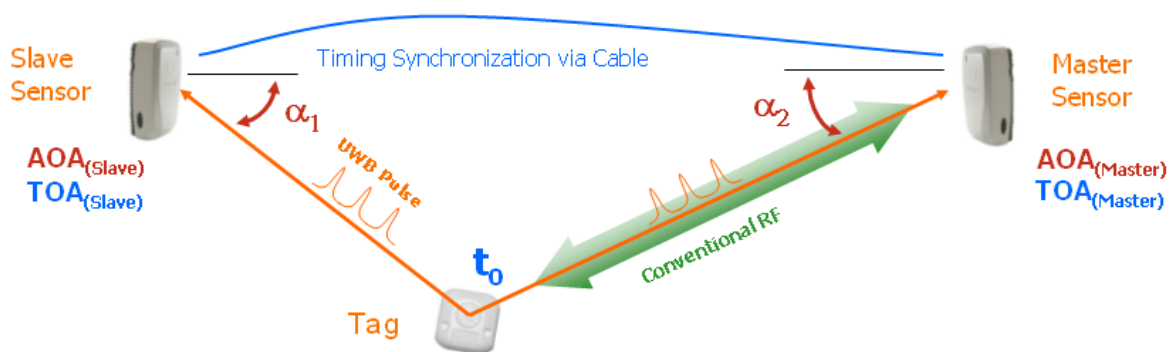


Abbildung 8: Schema der Positionsbestimmung eines Tags

Quelle: Ubisense News Germany. Zugriff am 08. Juli 2015 unter <http://ubisensegermany.blogspot.co.at/>

Abbildung 8 zeigt die Positionsbestimmung eines Tags durch zwei Sensoren. Da beide Sensoren die TOA des UWB-Signals empfangen haben, kann nun die TDOA (time difference of arrival), die Zeitdifferenz des Signaleingangs zwischen jeweils zwei Sensoren, berechnet werden. Die Sensoren schicken den Eingangswinkel und den Zeitpunkt des Eintreffens des UWB-Signals über die Ethernet-Verbindung zum Master-Sensor. Dieser berechnet die Position der einzelnen Ubitags.

3.2.2 Tags

Als Tags (Abbildung 9) werden jene Einheiten bezeichnet, welche die UWB-Signale aussenden und von den zu ortenden Objekten bzw. Personen getragen werden. Bei dem am USZ 1 installierten System kommen compact tags zum Einsatz. Diese sind laut Hersteller speziell für die Ortung von Equipment gedacht und besitzen eine Rundstrahlantenne (omni-directional), welche beste Ergebnisse in horizontaler Lage liefert.



Abbildung 9: UWB Compact Tag

Quelle: Ubisense News Germany. Zugriff am 08.Juli 2015 unter <http://ubisensegermany.blogspot.co.at/>

4 Methodik

Der folgende Abschnitt der Arbeit behandelt die Methodik der durchgeführten Validierung. Es werden Informationen bezüglich der Probanden, des Messaufbaus, der Datenaufnahme und Datenaufbereitung gegeben.

4.1 Probanden

Die Validierung wurde mit drei Probanden (Alter: 32 ± 3 Jahre, Größe: 170 ± 2 cm) durchgeführt. Ein entscheidendes Kriterium bei der Probandenauswahl war die Körpergröße. Da das Ubisense-System auf eine bestimmte Arbeitshöhe kalibriert werden kann, sollten die Probanden nach Möglichkeit keine zu starken Größenunterschiede aufweisen. An der Studie nahmen zwei Männer und eine Frau teil. Die Probanden trugen die Ubisense-Tags mit einem Haltesystem direkt am Kopf. Laut Leser et al. (2014) ist dies auch die beste Position für die höchstmögliche Genauigkeit des Systems.

4.2 Kalibrierung des Systems für die Validierung

Um eine möglichst große Genauigkeit des Systems zu gewährleisten, wurde das System zwei Mal auf die durchschnittliche Körpergröße der Probanden (170 cm) kalibriert. Damit der Kalibrierungsvorgang in der „Location Engine Config“ gestartet werden kann, muss die „LocationEngineCell 0001“ mit der rechten Maustaste angeklickt werden. Hierbei öffnet sich ein Untermenü, in dem der Punkt „Full Calibration“ (Abbildung 10) angewählt wird.

Bei der Kalibrierung wird ein ausgewählter Tag an fünf verschiedenen Positionen innerhalb des Messbereiches positioniert und für einen Zeitraum von ungefähr zehn Sekunden an dieser Position belassen. Wichtig hierbei ist die Höhe des Tags in Relation zum Boden. Diese muss während des ganzen Vorgangs gleich bleiben. In diesem Fall wurde ein fahrbarer Tisch mit daraufgestelltem Stativ verwendet. Das Stativ wurde so eingerichtet, dass der Tag eine Höhe von 170 cm in Relation zum Boden aufwies. Eine detaillierte Beschreibung des Kalibrierungsvorgangs ist im Ubisense® Manual (Ubisense® Inc., 2008) enthalten.

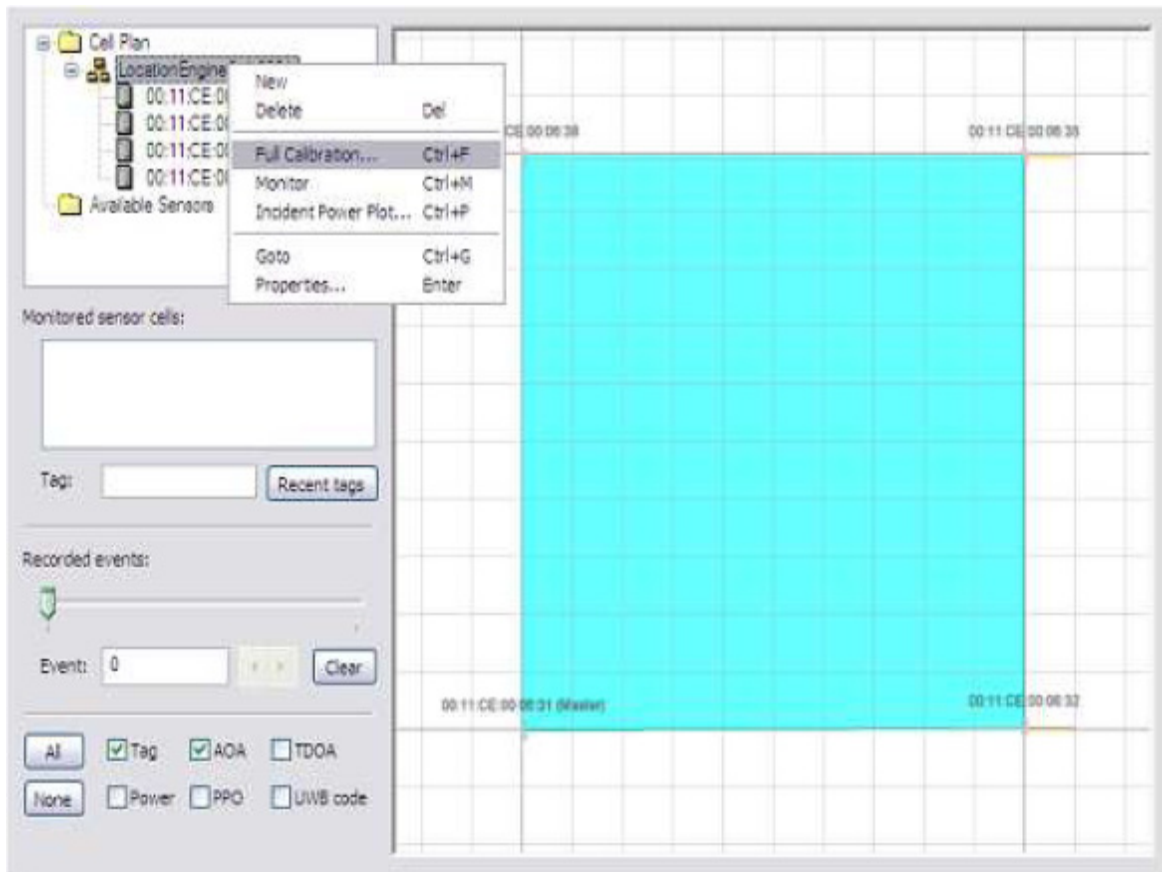


Abbildung 10: Kalibrierung des Ubisense-Systems

4.3 Messaufbau für die Validierung

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau der verschiedenen Läufe für die Validierung des Ubisense-Systems. Die Validierung erfolgte basierend auf der bereits durchgeführten Studie von Frecken et al. (2010). In dieser Studie wurde ebenfalls ein radiowellenbasiertes Positionserfassungssystem (LPM) des Unternehmens Abatec getestet. Hierbei wurde das System unter fußballspezifischen Bedingungen auf Genauigkeit und Validität überprüft. Die ausgewählten Laufparcours basieren hierbei auf den im Fußball am häufigsten vorkommenden Richtungsänderungen (Bloomfield, Polman & O'Donoghue, 2007), Sprintlängen und Sprintzeiten (Bishop, Spencer, Duffield & Lawrence, 2001). Auf weitere Details der Parcours, der Videoaufzeichnung sowie der Erfassung der Kontrollzeit wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

4.3.1 Laufparcours

Für die Erfassung der Daten unter dynamischen Bedingungen wurden insgesamt vier verschiedene Laufparcours im Messbereich eingerichtet. Eine schematische Darstellung der Parcours (5 m Gerade, 10 m 45°-Kurve, 10 m 90°-Kurve und 25 m gemischter Parcours) ist in Abbildung 11 zu sehen.

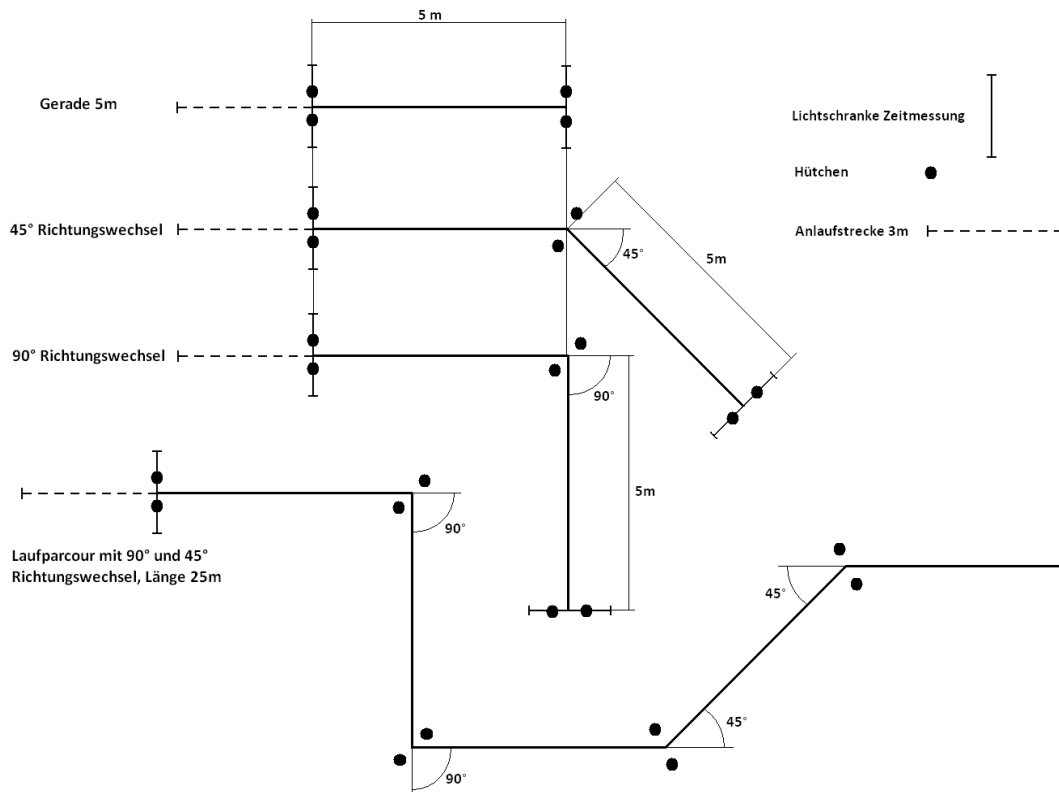


Abbildung 11: Schematische Darstellung der fußballspezifischen Parcours

Die verschiedenen Parcours wurden mit einem handelsüblichen Maßband vermessen und mit Hütchen eingerichtet. Der Start, die Richtungsänderungen sowie das Ziel wurden jeweils mit Hütchentoren gekennzeichnet. Die Positionen der Hütchen wurden auf dem Hallenboden mittels Klebeband und Markierung gekennzeichnet. Die Probanden starteten jeweils 3 m vor dem Starttor. Diese Startposition wurde ebenfalls auf dem Hallenboden markiert. Zusätzlich wurde bei jedem Parcours die Laufmitte mittels Klebeband sichtbar gemacht. Die Probanden sollten den aufgebauten Parcours so genau wie möglich folgen, die Mittellinie diente somit als Orientierungshilfe. Abbildung 12 zeigt den 10-m-45°-Richtungswechsel.



Abbildung 11: 10-m-45°-Richtungswechsel

Jeder Parcours wurde von jedem Probanden jeweils zehn Mal durchlaufen. Dabei wurden pro Parcours drei Geschwindigkeitsstufen gewählt. Die gewählten Geschwindigkeitsstufen lassen sich nach Di Salvo et al. (2006, S. 223) wie folgt einteilen:

- Walking (2–6 km/h)
- Jogging (6,1–11 km/h)
- Moderate speed running (14,1–19 km/h)

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die drei genannten Geschwindigkeitsstufen mit langsam, mittel und schnell bezeichnet. Beim Versuch, noch höhere Geschwindigkeiten zu testen, hatten die Probanden Probleme, dem Laufweg exakt zu folgen. Die Durchführung der Tests bei der Geschwindigkeitsstufe „moderate speed running“ erwies sich als Limit bezüglich Tempo und Laufgenauigkeit der Probanden. Nach Festlegung der Laufgeschwindigkeiten und Durchgänge je Proband wurde folgender Testablauf festgelegt:

- 5-m-Gerade: pro Proband jeweils 10 Läufe bei langsam, mittel und schnell
- 10-m-45°-Kurve: pro Proband jeweils 10 Läufe bei langsam, mittel und schnell
- 10-m-90°-Kurve: pro Proband jeweils 10 Läufe bei langsam, mittel und schnell
- 25 m gemischter Parcours: pro Proband jeweils 10 Läufe bei langsam, mittel und schnell

Durch die vorgegeben Laufwege der verschiedenen Parcours und die gewünschten Geschwindigkeitsbereiche war es möglich Laufzeiten zu berechnen. Diese Laufzeiten dienten den Probanden/innen als Orientierungshilfe für das einschätzen der Geschwindigkeit. Zum Beispiel ergibt sich beim Parcours 10-m-45°-Kurve bei der Geschwindigkeitsstufe mittel (6,1-11 km/h) eine durchschnittliche Laufzeit von ca. 4 s.

$$v = 8,5 \text{ km/h} \rightarrow 2,4 \text{ m/s}$$

$$s = 10 \text{ m}$$

$$t = s / v = 10 / 2,4 = 4,14 \text{ s.}$$

Diese Laufzeiten wurden für alle Geschwindigkeitsstufen und Parcours berechnet und den Probanden/innen für ein leichteres Einschätzen der gewünschten Geschwindigkeit mitgeteilt.

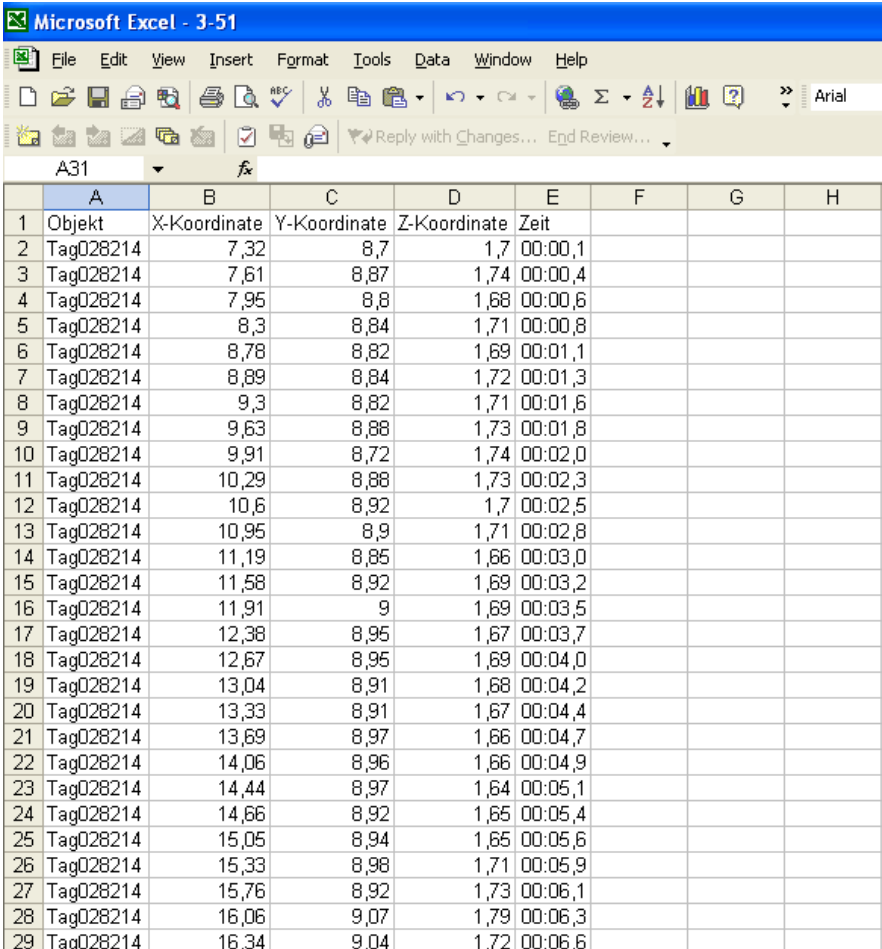
4.4 Datenaufnahme

Die nun folgenden Abschnitte behandeln den Prozess der Datenaufzeichnung. Hierbei werden die einzelnen Punkte der Datenaufzeichnung genauer beschrieben und abgehandelt.

4.4.1 Ubisense-Positionsdaten

Die Probanden hatten die Möglichkeit, die verschiedenen Parcours zu testen, um ein Gefühl für die jeweilige Geschwindigkeitsstufe zu finden und dem Laufweg des Parcours so genau wie möglich zu folgen. Nach einer Eingewöhnungsphase von ca. 10 Minuten pro Parcours wurde mit den Messungen begonnen. Jedem Probanden wurde ein bestimmter Tag zugeordnet und seine Seriennummer notiert. Die Läufe und die damit verbundene Datenaufnahme der Ubisense-Daten wurden auf Kommando des Untersuchers gestartet. Die Aufzeichnung der Ubisense-Positionsdaten erfolgte manuell mittels Mausklick und wurde nach jedem Lauf, sobald der Proband den aktuellen Parcours verlassen hatte, beendet. So wurde pro Lauf eines Probanden eine Excel-Datei mit den Positionsdaten des Ubisense-Systems erstellt. Die Abtastrate von Ubisense betrug bei den Aufnahmen 4,2 Hz je Tag. Tabelle 4 zeigt die Positionsdaten eines Tags für einen 5-m-Gerade-Lauf. Es wurden die Rohdaten des Ubisense-Systems für die weitere Auswertung verwendet und somit keine Filterung angewendet.

Tabelle 4: Ubisense-Positionsdaten für 5-m-Gerade-Lauf



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Objekt	X-Koordinate	Y-Koordinate	Z-Koordinate	Zeit			
2	Tag028214	7,32	8,7	1,7	00:00,1			
3	Tag028214	7,61	8,87	1,74	00:00,4			
4	Tag028214	7,95	8,8	1,68	00:00,6			
5	Tag028214	8,3	8,84	1,71	00:00,8			
6	Tag028214	8,78	8,82	1,69	00:01,1			
7	Tag028214	8,89	8,84	1,72	00:01,3			
8	Tag028214	9,3	8,82	1,71	00:01,6			
9	Tag028214	9,63	8,88	1,73	00:01,8			
10	Tag028214	9,91	8,72	1,74	00:02,0			
11	Tag028214	10,29	8,88	1,73	00:02,3			
12	Tag028214	10,6	8,92	1,7	00:02,5			
13	Tag028214	10,95	8,9	1,71	00:02,8			
14	Tag028214	11,19	8,85	1,66	00:03,0			
15	Tag028214	11,58	8,92	1,69	00:03,2			
16	Tag028214	11,91	9	1,69	00:03,5			
17	Tag028214	12,38	8,95	1,67	00:03,7			
18	Tag028214	12,67	8,95	1,69	00:04,0			
19	Tag028214	13,04	8,91	1,68	00:04,2			
20	Tag028214	13,33	8,91	1,67	00:04,4			
21	Tag028214	13,69	8,97	1,66	00:04,7			
22	Tag028214	14,06	8,96	1,66	00:04,9			
23	Tag028214	14,44	8,97	1,64	00:05,1			
24	Tag028214	14,66	8,92	1,65	00:05,4			
25	Tag028214	15,05	8,94	1,65	00:05,6			
26	Tag028214	15,33	8,98	1,71	00:05,9			
27	Tag028214	15,76	8,92	1,73	00:06,1			
28	Tag028214	16,06	9,07	1,79	00:06,3			
29	Tag028214	16,34	9,04	1,72	00:06,6			

4.4.2 Erfassung der Kontrollzeit mittels Lichtschrankensystem

Neben den Positionsdaten des Ubisense-Systems wurden die Laufzeiten der Probanden mit einem Lichtschrankensystem des Herstellers Alge Timing aufgezeichnet. Die mittels Lichtschranke aufgezeichneten Laufzeiten der einzelnen Läufe dienen als Kontrollwert für die Daten von Ubisense. Zusätzlich waren die erfassten Laufzeiten notwendig um mittels den Daten der Laufstreckenlänge die Laufgeschwindigkeit zu berechnen. Abbildung 12 zeigt das aufgebaute Lichtschrankensystem bei dem 10-m-45°-Richtungswechsel-Parcours. Wie bereits erwähnt wurde pro Lauf eines Probanden eine Excel-Datei mit den Positionsdaten des Ubisense-Systems erstellt. Diese Datei erhielt als Dateinamen die vom Lichtschrankensystem aufgezeichnete Zeit. Dies erwies sich als schnellste und sicherste Methode, die Daten beider Systeme jedem Lauf zuzuordnen.

4.4.3 Videoaufnahme

Als zusätzliches Kontrollmittel wurde der gesamte Versuchsablauf mittels der installierten Videokameras aufgezeichnet. Anhand des Videomaterials konnte überprüft werden, ob die Probanden den Laufweg des jeweiligen Parcours genau eingehalten haben. Bei Ausreißern in den Positionsdaten konnte mittels Video ebenfalls überprüft werden, ob es sich um Lauffehler der Probanden gehandelt hat oder um Fehler des Ubisense-Systems.

4.5 Datenaufbereitung

Nachdem die Datenerfassung aller Läufe abgeschlossen worden war, standen die aufgenommenen Positionsdaten des Ubisense-Systems zur Verfügung. Da für jeden Lauf eines Probanden eine Excel-Datei angelegt wurde, führte dies zu insgesamt 360 Datensätzen. Die gesamte Datenaufbereitung erfolgte in Microsoft Excel. Im ersten Schritt wurden die Positionsdaten der Tore (Start, Richtungswechsel, Ziel) der jeweiligen Parcours in eine Excel-Vorlage eingefügt (Abbildung 14). Diese Positionsdaten wurden mittels der Ubisense-Tags ausgemessen und dienten zusätzlich zur Bestimmung der statischen Genauigkeit des Systems.

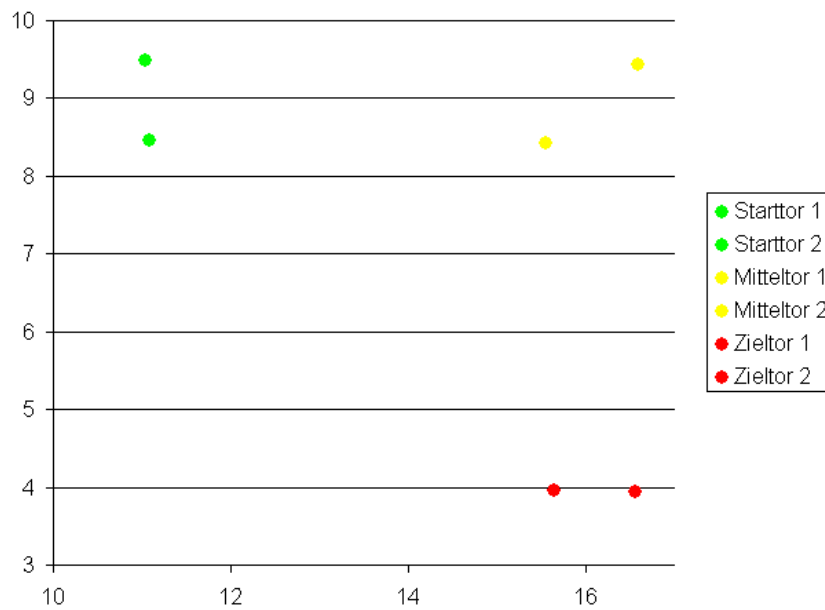


Abbildung 12: Positionsdaten der Tore in Microsoft Excel eingefügt

Da nun die Positionsdaten der Tore bekannt waren, wurden in einem zweiten Schritt die Positionsdaten der Probanden bereinigt. Dies bedeutet, dass nur die Positionsdaten innerhalb des Parcours für die weitere Berechnung herangezogen wurden. (Abbildung 15). Für die Bestimmung der Position beim Start und Zieltor musste diese aus den Positionsdaten vor und nach dem Tor Anhand linearer Interpolation berechnet werden.

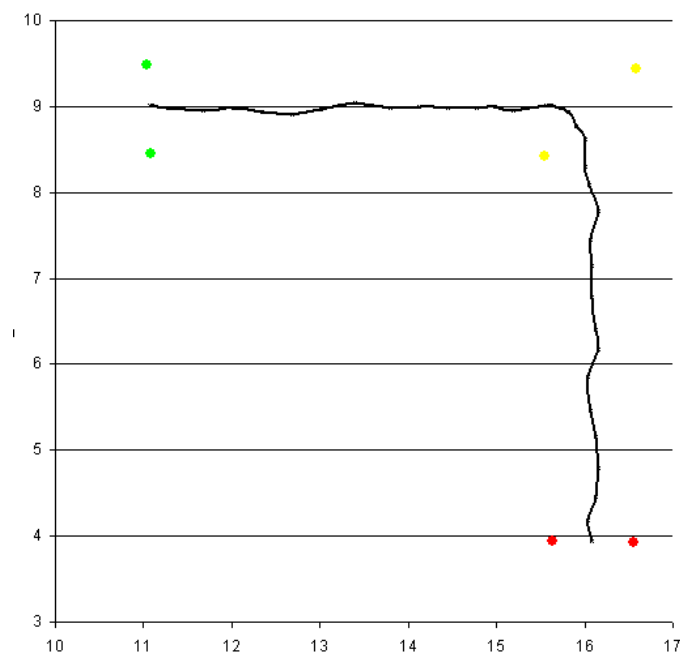


Abbildung 13: Positionsdaten eines Laufes des Parcours 10-m-90°-Richtungswechsel

Im nächsten Schritt wurde für jeden Parcours eine Vorlage unter Microsoft Excel erstellt, in die die jeweiligen Positionsdaten eines Laufes für die weiteren Berechnungen eingesetzt wurden. Dies war notwendig, um die hohe Anzahl an einzelnen Datensätzen einheitlich zu gliedern und in weiterer Folge zusammenzufassen. Diese Vorlage ermöglichte die Berechnung und Auflistung des von Ubisense ermittelten Laufweges, der Geschwindigkeit und der Laufzeit. Zusätzlich wurden die Kontrollzeit des Lichtschrankensystems, der vermessene Laufweg sowie die daraus errechnete Geschwindigkeit tabellarisch aufgetragen. Die Daten der einzelnen Läufe wurden anschließend erneut zusammengefasst. Tabelle 5 zeigt die zusammengeführten Daten aller zehn Läufe eines Probanden bei der Geschwindigkeitsstufe mittel. Diese Berechnungen wurden für alle Probanden, vier Parcours und alle drei Geschwindigkeitsstufen separat durchgeführt.

Tabelle 5: Ausschnitt der zusammengefassten Daten einer Messreihe, 5m-Gerade, Geschw. mittel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2		1. Lauf	2. Lauf	3. Lauf	4. Lauf	5. Lauf	6. Lauf	7. Lauf	8. Lauf	9. Lauf	10. Lauf	
3	Zeit Ubisense [s]:	1,711	1,698	1,905	1,825	1,912	1,847	1,789	1,524	1,810	1,585	
4	Zeit Lichtschränke [s]:	1,640	1,740	1,840	1,830	1,930	1,900	1,670	1,610	1,770	1,590	
5	Laufweg Ubisense [m]:	5,045	5,027	5,118	5,056	5,066	5,027	5,049	5,029	5,132	5,015	
6	Geschwindigkeit Ubisense [km/h]:	10,614	10,659	9,672	9,973	9,539	9,799	10,159	11,880	10,207	11,391	
7	Geschwindigkeit Lichtschränke [km/h]:	10,976	10,345	9,783	9,836	9,326	9,474	10,778	11,180	10,169	11,321	
8												
9	Laufweg Ubisense [cm]:	504,47	502,73	511,80	505,59	506,60	502,74	504,85	502,90	513,16	501,51	
10	Abweichung von 500cm [cm]:	4,47	2,73	11,80	5,59	6,60	2,74	4,85	2,90	13,16	1,51	
11												
12	Mittelwert Abweichung Laufweg:	4,05										
13	Standardabweichung Laufweg:	3,60										
14	min:	0,23										
15	max:	13,16										
16	Abweichung Laufweg Ubisense in %:	0,8093275										
17	vc:	0,0080283	0,80283									
18												
19	Abweichung Geschwindigkeit Ubisense:	-0,361	0,314	-0,111	0,137	0,212	0,325	-0,619	0,700	0,037	0,070	
20												
21	Mittelwert Abweichung Geschwindigkeit:	-0,129										
22	Standardabweichung Geschwindigkeit:	0,3481222										
23												
24	Mittel Geschwindigkeit Lichtschränke [km/h]:	10,815										
25	Standardabweichung Geschw. Lichtschränke:	0,94										
26												
27	Mittel Geschwindigkeit Ubisense [km/h]:	10,681										
28	Standardabweichung Geschw. Ubisense:	0,8446737										
29												
30	Abweichung in %:	-1,190517										
31	Standardabweichung in %:	3,2189801										
32												

Folgend werden die verwendeten Größen aus Tabelle 5 beschrieben.

Zeit Ubisense (Zeile 3):

Die von Ubisense erfasste Laufzeit für das durchlaufen des Parcours. Hierbei wurden die Ubisense Positionsdaten mit den dazugehörigen Zeitangaben im Bereich des Start und Zieltors für die Berechnung herangezogen.

Zeit Lichtschranke (Zeile 4):

Von dem Lichtschrankensystem erfasste Laufzeit für das durchlaufen des Parcours.

Laufweg Ubisense (Zeile 5):

Von Ubisense erfasster Laufweg des Probanden beim durchlaufen des Parcours.

Geschwindigkeit Ubisense (Zeile 6):

Aus den Größen *Zeit Ubisense* und *Laufweg Ubisense* berechnete Geschwindigkeit.

Geschwindigkeit Lichtschranke (Zeile 7):

Aus den Größen *Zeit Lichtschranke* und *Länge des vordefinierten Laufpfades* berechnete Geschwindigkeit.

Abweichung vom vordefinierten Laufweg (Zeile 10):

Die Abweichung von Ubisense in cm vom vordefinierten Laufweg bei dem jeweiligen Lauf.

Mittelwert Abweichung Laufweg (Zeile 12):

Mittelwert des gesamten Datensatzes aus Zeile 10.

Standardabweichung Laufweg (Zeile 13):

Standardabweichung des gesamten Datensatzes aus Zeile 10.

min (Zeile 14):

Kleinste Abweichung des Datensatzes aus Zeile 10.

max (Zeile 15):

Größte Abweichung des Datensatzes aus Zeile 10.

Abweichung Laufweg Ubisense in % (Zeile 16):

Abweichung von Ubisense vom vordefinierten Laufweg in Prozent.

Variationskoeffizient (Zeile 17):

Berechnet aus der Standardabweichung und dem Mittel des von Ubisense erfassten Laufweges. Für die Ausgabe in den Tabellen in Prozent.

Abweichung Geschwindigkeit Ubisense (Zeile 19):

Abweichung der Größe *Geschwindigkeit Ubisense* von der Größe *Geschwindigkeit Lichtschranke* in km/h.

Mittelwert Abweichung Geschwindigkeit (Zeile 21):

Mittelwert des gesamten Datensatzes aus Zeile 19.

Standardabweichung Geschwindigkeit (Zeile 22):

Standardabweichung des gesamten Datensatzes aus Zeile 19.

Mittel Geschwindigkeit Lichtschanke (Zeile 24):

Mittelwert des gesamten Datensatzes der Größe *Geschwindigkeit Lichtschanke* (Zeile 7).

Standardabweichung Geschwindigkeit Lichtschanke (Zeile 25):

Standardabweichung des gesamten Datensatzes der Größe *Geschwindigkeit Lichtschanke* (Zeile 7).

Mittel Geschwindigkeit Ubisense (Zeile 27):

Mittelwert des gesamten Datensatzes der Größe *Geschwindigkeit Ubisense* (Zeile 7).

Standardabweichung Geschw. Ubisense (Zeile 28):

Standardabweichung des gesamten Datensatzes der Größe *Geschwindigkeit Ubisense* (Zeile 7).

Abweichung in % (Zeile 30):

Relative Abweichung der Geschwindigkeit von Ubisense in Prozent. Berechnet aus *Mittel Abweichung Geschwindigkeit* (Zeile 21) und *Mittel Geschwindigkeit Lichtschanke* (Zeile 24).

Standardabweichung in % (Zeile 31):

Relative Standardabweichung in Prozent. Berechnet aus *Standardabweichung Geschwindigkeit* (Zeile 22) und *Mittel Geschwindigkeit Lichtschanke* (Zeile 24).

4.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte im Programm Microsoft Excel 2002®. Die statistischen Verfahren wurden in Anlehnung an die Studie von Frencken et al. (2010) ausgewählt. Der von Ubisense aufgezeichnete Laufweg wurde mittels deskriptiver Statistik und dem Variationskoeffizienten beschrieben. Es wurde die absolute sowie relative (%) Abweichung der erhobenen Messgrößen berechnet (Tabelle 5). Zusätzlich wurde der Variationskoeffizient berechnet und in Prozent angegeben. Die Auswertung der Geschwindigkeit erfolgte anhand linearer Regression. Die lineare Regression ist ein Verfahren der Regressionsanalyse. Hierbei soll der Zusammenhang zwischen der Größe *Geschwindigkeit Ubisense* und *Geschwindigkeit Lichtschanke* quantitativ beschrieben werden. Dabei wurde als Vorlage die Kalkulationstabelle von Hopkins (2009) herangezogen. In Tabelle 6 ist der Eingabebereich der Daten für die lineare Regression zu sehen. In Spalte D der Tabelle 6 wurden die Geschwindigkeitsdaten von Ubisense (Zeile 6 aus Tabelle 5) eingegeben. In Spalte E der

Tabelle 6 sind die dazugehörigen Referenzwerte vom Lichtschrankensystem (Zeile 7 aus Tabelle 5).

Tabelle 6: Eingabebereich der Daten in die Kalkulationstabelle, 5m-Gerade, Geschw. mittel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
15				<u>Raw data</u>						
16				Y	X					
				(criterion)	(practical)		predicted	residual	prac-crit	
17	Read me			10,61	10,98		10,83	-0,21	0,36	
18				10,66	10,34		10,30	0,36	-0,31	
19				9,67	9,78		9,82	-0,15	0,11	
20				9,97	9,84		9,87	0,10	-0,14	
21				9,54	9,33		9,44	0,10	-0,21	
22				9,80	9,47		9,57	0,23	-0,33	
23				10,16	10,78		10,66	-0,50	0,62	
24				11,88	11,18		11,00	0,88	-0,70	
25				10,21	10,17		10,15	0,06	-0,04	
26				11,39	11,32		11,12	0,28	-0,07	
27				11,51	11,46		11,24	0,28	-0,05	
28				9,85	10,00		10,01	-0,16	0,15	
29				9,84	10,34		10,30	-0,46	0,51	
30				9,41	9,68		9,74	-0,33	0,27	
31				10,83	11,04		10,88	-0,05	0,21	
32				10,08	9,68		9,74	0,34	-0,40	
33				10,60	10,91		10,77	-0,17	0,30	
34				9,67	9,68		9,74	-0,06	0,00	
35				10,63	10,47		10,40	0,23	-0,16	
36				9,99	10,84		10,72	-0,73	0,86	
37				11,31	11,54		11,30	0,01	0,23	
38				12,16	12,33		11,96	0,20	0,17	
39				12,19	12,68		12,25	-0,06	0,49	
40				11,01	11,32		11,12	-0,10	0,31	
41				11,84	11,76		11,49	0,35	-0,08	
42				11,63	12,08		11,75	-0,12	0,45	
43				10,52	10,47		10,40	0,12	-0,05	
44				11,29	11,84		11,55	-0,27	0,56	
45				11,66	12,24		11,89	-0,23	0,59	
46				11,35	11,54		11,30	0,06	0,18	
47										
48										
49										
50										
51										

Die Ergebnisse der Kalkulationstabelle für den Parcours *5m-Gerade* bei der *Geschwindigkeit mittel* sind in Tabelle 7 zu sehen. Aus dieser Kalkulationstabelle wurden die Werte typical error of the estimate (TEE) und der Korrelationskoeffizient für das Erstellen der Ergebnistabellen verwendet. Der typical error of the estimate (TEE) wird auch als Standardfehler bezeichnet. Mit dem Standardfehler der Regression kann die Güte der Regressionsgeraden bestimmt werden. Er ist ein Maß dafür, wie groß der Abweichungsfehler von der Regressionsgeraden ist.

Tabelle 7: Ausgabemaske der Kalkulationstabelle, 5m-Gerade, Geschw. mittel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
80						Level for confidence limits (%):				95
81	Measures of validity for RAW variables									
	Calibration equation:					Lower	Upper	±	×/÷	
82	Y = intercept + slope*X					Estimate	CL	CL	CL	
83	intercept					1,616	0,195	3,037	1,421	
84	slope					0,839	0,708	0,970	0,131	
85	Enter an X value here:					1,00				
86	Predicted (estimated) Y at X					2,46	1,01	3,90	1,45	
87	Bias at X value									
88	in raw units					-1,46	-2,75	-0,16	1,29	
89	standardized					-1,72	-3,25	-0,19	1,53	
90										
91	Overall bias (for measures in the same units)									
92	Mean bias in raw units					0,13	0,00	0,26	0,13	
93	Mean bias standardized					0,15	0,00	0,31	0,15	
94	SD of bias in raw units					0,35	0,28	0,47	-	1,31
95	SD of bias standardized					0,41	0,33	0,56	-	1,31
96										
97	Smallest important difference									
98	in Y, standardized					0,20				
99	equivalent in Y in raw units					0,17	0,13	0,23	-	1,31
100	equivalent in X, standardized					0,22	0,21	0,23		
101	equivalent in X in raw units					0,20	0,16	0,27	-	1,31
102										
						Lower	Upper		×/÷	
103	Typical error of estimate					Estimate	CL	CL	CL	
104	in raw units					0,32	0,25	0,43	-	1,31
						Lower	Upper	approx.		
105						Estimate	CL	CL	±CL	
106	Pearson correlation					0,93	0,85	0,97	0,06	

Eine weitere Größe, die anhand der Kalkulationstabelle berechnet wurde, war der Korrelationskoeffizient. Dieser soll den linearen Zusammenhang zwischen den aufgezeichneten Daten von Ubisense und dem Referenzsystem beschreiben.

5 Ergebnisse

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen der statischen und dynamischen Überprüfung des Ubisense-Systems.

5.1 Statische Messungen

Bei der Überprüfung des Ubisense-Systems unter statischen Bedingungen wurde eine durchschnittliche Abweichung entlang der X-Achse von 3 ± 1 cm und entlang der Y-Achse von 2 ± 1 cm festgestellt. Das System war in einer Sporthalle installiert. Die X-Achse beschreibt hierbei die Hallenlängsseite, die Y-Achse kennzeichnet die Hallenbreite. Hierbei wurden Start- und Zieltor als Referenzpunkte gewählt, somit wurden vier Messpunkte für die statische Messung verwendet. Dieser Aufbau wurde in der Hallenmitte durchgeführt. Die in der Halle vermessenen Positionen der Tore wurden den Werten von Ubisense für diese Punkte gegenübergestellt.

5.2 Dynamische Messungen

Dieses Kapitel stellt den Schwerpunkt der durchgeführten Messungen dar. Anhand folgender Ergebnisse soll die Genauigkeit und Validität des Ubisense-Systems unter fußballspezifischen Bedingungen bestimmt werden. Die folgenden Kapitel nehmen Bezug auf die jeweiligen Parcours und Geschwindigkeitsstufen. Die dabei gewonnenen Daten werden sowohl graphisch als auch tabellarisch dargestellt. Für ein besseres Verständnis der einzelnen Parcours werden der Aufbau sowie die zehn Läufe eines Probanden bei dem jeweiligen Parcours graphisch dargestellt.

5.2.1 5-m-Gerade

Der Laufparcours 5-m-Gerade stellte für die Probanden/-innen die geringste lauftechnische Anforderung dar, da keine Richtungsänderungen vorhanden sind. Die Probanden/-innen mussten einem auf dem Hallenboden gekennzeichneten, geraden Wegverlauf möglichst genau folgen. Aufgrund der geringen Anforderung an die Probanden wurde mit diesem Messaufbau begonnen.

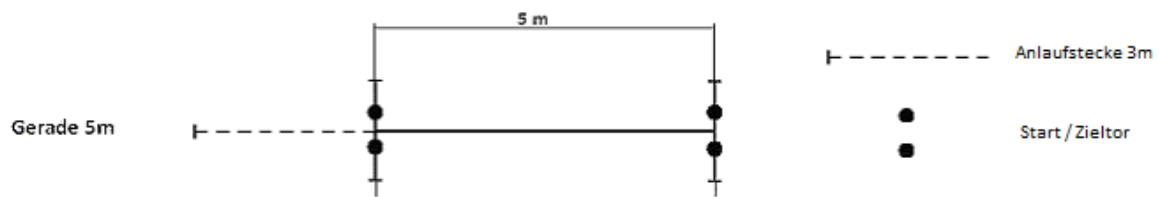


Abbildung 14: 5-m-Gerade

5.2.1.1 Geschwindigkeit langsam

Zu Beginn der Datenaufzeichnung wurden die Probanden angewiesen, den Laufparcours innerhalb des Geschwindigkeitsbereichs von 2 bis 6 km/h (langsam) zu absolvieren. Für eine bessere Einschätzung des gewünschten Geschwindigkeitsbereichs wurde den Probanden die durchschnittliche Laufzeit mitgeteilt. Die Berechnung der Laufzeit wird in Kapitel 4.3.1 erklärt. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase absolvierte jeder Proband zehn Durchgänge in Folge, bevor der/die nächste Läufer/-in an der Reihe war. Dies erleichterte die Datenspeicherung erheblich und hatte zugleich den Vorteil, dass der Läufer das Gefühl für die zu wählende Geschwindigkeit nicht verlor. In den folgenden Abbildungen 15 – 17 werden die zehn Läufe der einzelnen Probanden graphisch dargestellt.

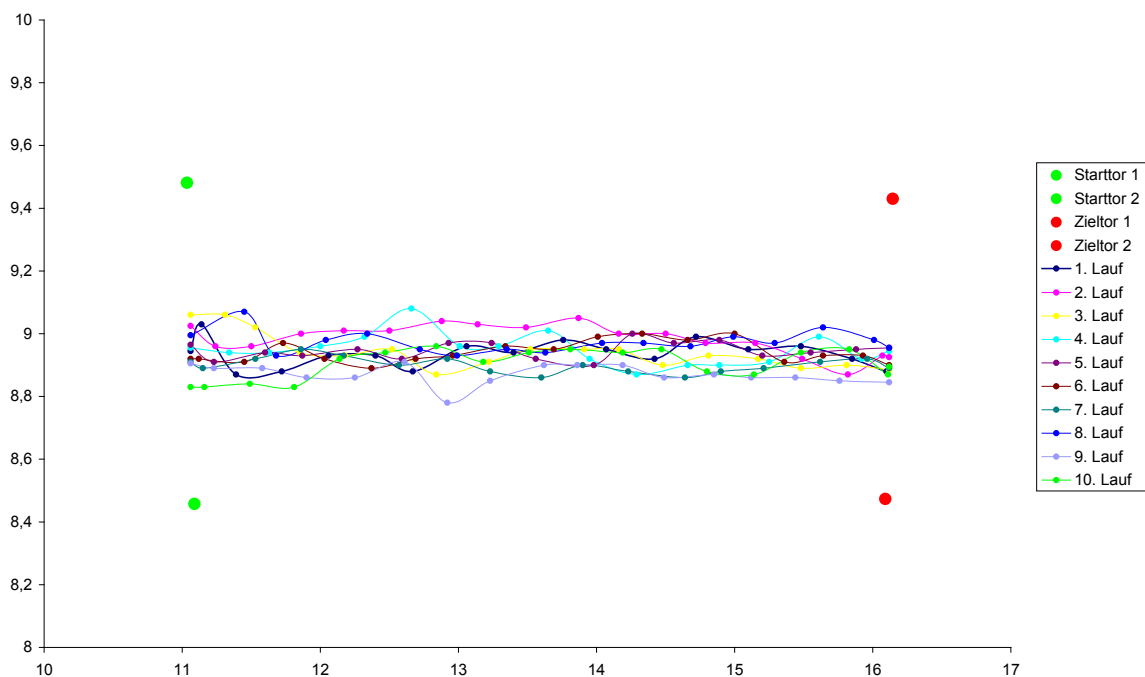


Abbildung 15: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam

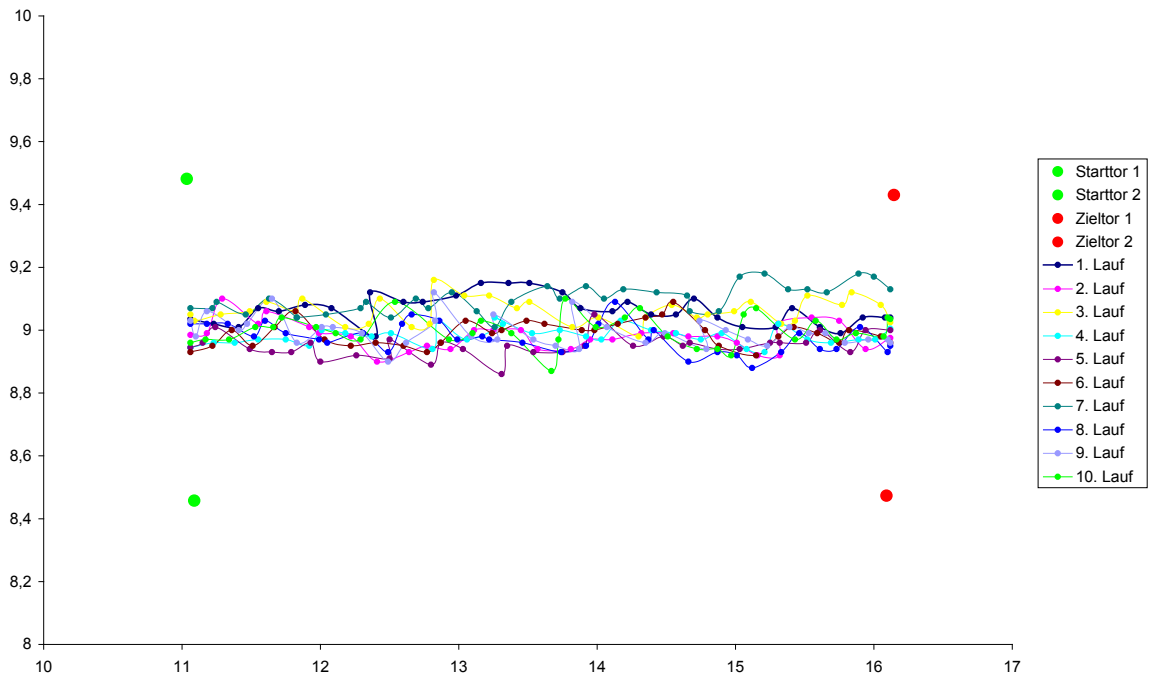


Abbildung 16: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam

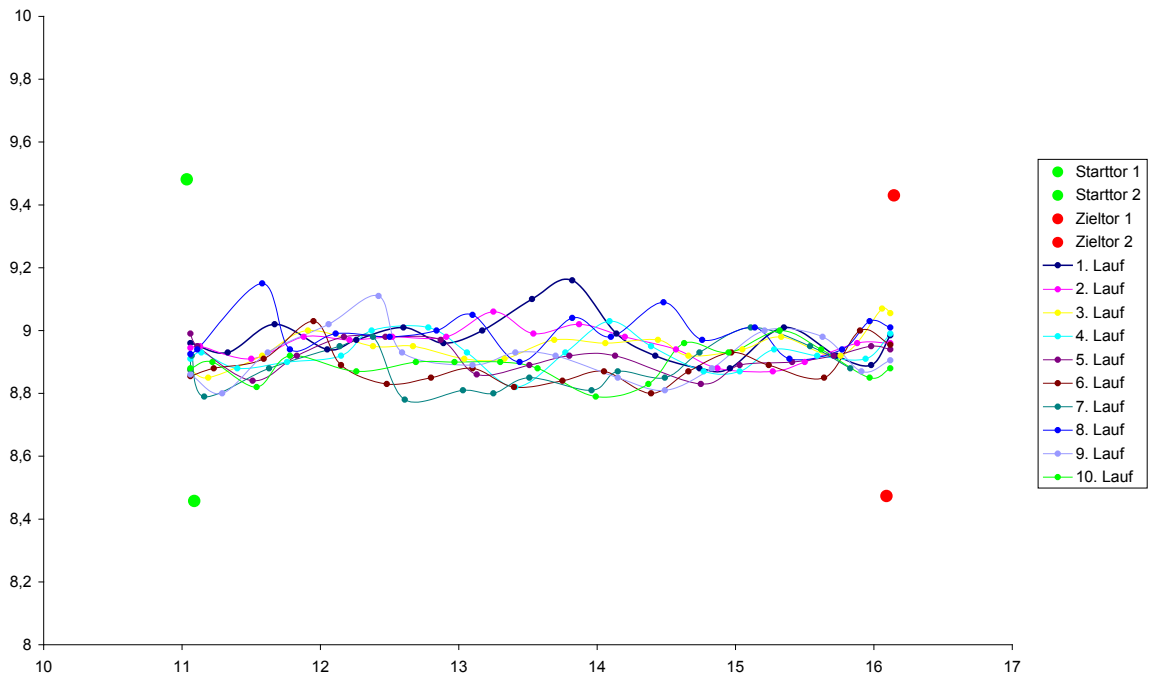


Abbildung 17: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam

Die Datensätze der Messungen beim Laufparcours 5-m-Gerade bei der Geschwindigkeit langsam zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer. Lediglich Tag 025030 arbeitete zu Beginn der Messungen mit einer Abtastrate von 8,4 Hz anstatt der üblichen 4,2 Hz. Vergleicht man die Abbildungen 15 bis 17, so lässt sich diese Frequenzabweichung sehr leicht an der höheren Positionsdatendichte erkennen. Eine Änderung der Abtastrate mittels der Ubisense-Software war mir nicht bekannt, somit mussten die Daten auf 4,2 Hz umgerechnet werden, um eine einheitliche Abtastrate für die weiteren Berechnungen zu erhalten. Dieses Ereignis war bei den weiteren Messungen jedoch nicht mehr gegeben, da bereits beim Laufparcours 5-m-Gerade bei der Geschwindigkeit *schnell* alle Tags mit der gleichen Frequenz die Daten aufgezeichnet haben.

Die Auswertung der aufgezeichneten Laufwege bei diesem Parcours ist in Tabelle 8 abgebildet. Ubisense überschätzt den tatsächlichen Laufweg um $24,3 \pm 17,27$ cm. Das LPM-System in der Studie von Frencken et al. 2010 überschätzte die Distanz bei diesen Messungen ebenfalls, jedoch lag die Abweichung im Mittel bei nur 1 cm. Bei der relativen Abweichung bedeutet dies 4,86 % bei Ubisense und 0,2 % bei LPM.

Tabelle 8: Auswertung Laufweg: Geschwindigkeit langsam, 5-m-Gerade

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
langsam				
5m Gerade	500	$24,30 \pm 17,27$	7,57 bis 91,64	4,86

Ubisense überschätzt sich bei der Geschwindigkeit im Mittel um 0,09 km/h bei dieser Geschwindigkeit. Die genauen Daten sind in Tabelle 9 ersichtlich. Die kleine Abweichung bei der Geschwindigkeit wird durch die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit erklärt. Da Ubisense zum Zeitpunkt der Messungen keine Daten bezüglich der Geschwindigkeit lieferte, wurde die Geschwindigkeit aus den Positionsdaten und der durch Ubisense ermittelten Laufzeit berechnet. Dies liefert lediglich eine Durchschnittsgeschwindigkeit der jeweiligen Läufe, was zu einem kleineren Fehler in der Abweichung führen kann.

Tabelle 9: Auswertung Geschwindigkeit: Geschwindigkeit langsam, 5-m-Gerade

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE	95% CI	r
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw		
Langsam	$4,93 \pm 0,2$	$5,11 \pm 0,19$	$0,18 \pm 0,19$ ($3,57\% \pm 3,8\%$)	0,17	$0,13 - 0,22$	0,54
5m Gerade						

5.2.1.2 Geschwindigkeit Mittel

Die Probanden wurden nun aufgefordert, den aktuellen Parcours in einem Geschwindigkeitsbereich von 6,1 bis 11 km/h zu absolvieren. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase auf die neue Geschwindigkeit wurden die Daten erneut aufgezeichnet. Die Läufe der Probanden werden in den Abbildungen 18 - 20 dargestellt.

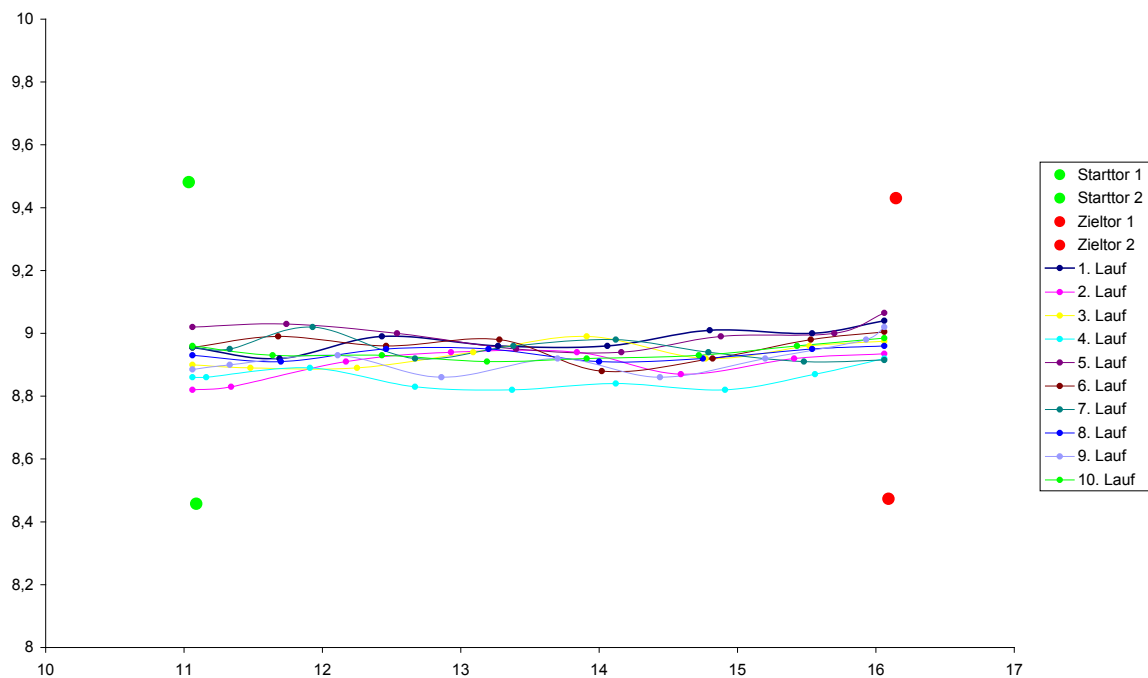


Abbildung 18: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel

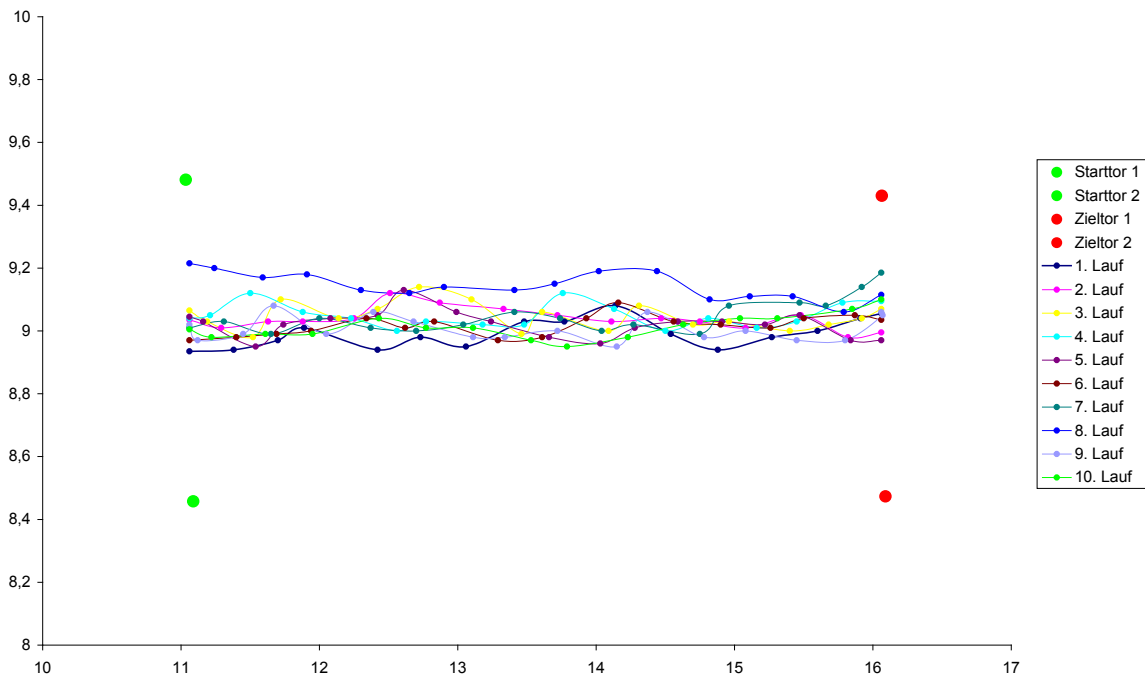


Abbildung 19: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel

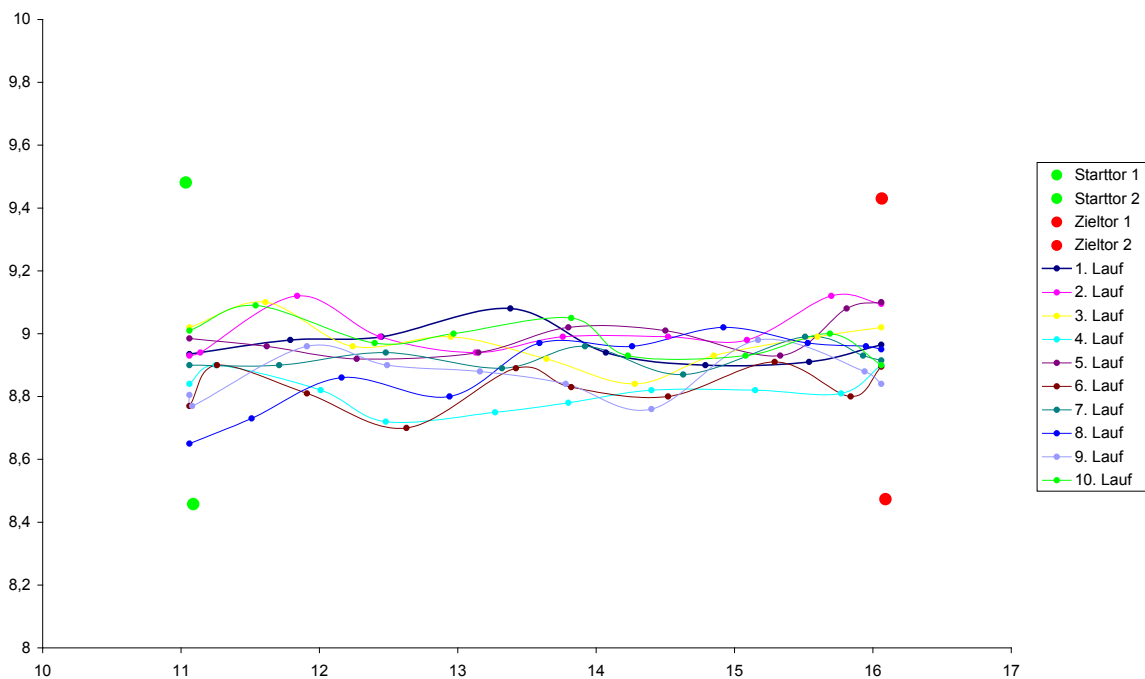


Abbildung 20: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel

Abbildung 20 zeigt das Laufwegediagramm des Probanden mit dem Tag 028214. Dabei fällt der blau dargestellte achte Lauf besonders auf, da dieser beim Starttor weit vom gewünschten Laufweg abweicht. Dieser Lauf wurde mit dem aufgezeichneten Video kontrolliert. Auf dem Video ist keine nennenswerte Abweichung des Probanden von der

Laufwegmarkierung ersichtlich. Die weiteren Datensätze dieser Messungen zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer. Lediglich der Tag 025030 arbeitete wiederholt mit einer Abtastrate von 8,4 Hz, anstatt der üblichen 4,2 Hz. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 10 ersichtlich. Die Daten zeigen auch hier eine Überschätzung des zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel $3,99 \pm 3,55$ cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 500 cm eine Abweichung von 0,8 %. Ein Vergleich zum LPM-System kann bei dieser Geschwindigkeitsstufe nicht gemacht werden, da Frencken et al. (2010) diesen Geschwindigkeitsbereich nicht untersucht haben.

Tabelle 10: Auswertung Laufweg: Geschwindigkeit mittel, 5-m-Gerade

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
mittel				
5m Gerade	500	$3,99 \pm 3,55$	0,23 bis 13,19	0,8

Ubisense überschätzt sich bei der Geschwindigkeit im Mittel um 0,13 km/h bei dieser Geschwindigkeit. Die genauen Daten sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11: Auswertung Geschwindigkeit: Geschwindigkeit mittel, 5-m-Gerade

Auswertung Geschwindigkeit					
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE	r
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw 95% CI	
mittel					
5m Gerade	$10,84 \pm 0,93$	$10,71 \pm 0,84$	$0,13 \pm 0,35$ (-1,18% $\pm$ 3,2%)	0,32 0,25 – 0,43	0,94

5.2.1.3 Geschwindigkeit schnell

Zuletzt galt es den Aufbau „5-m-Gerade“ im Geschwindigkeitsbereich über 11 km/h zu absolvieren. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase auf die neue Geschwindigkeit wurden die Daten erneut aufgezeichnet. Die gesamten Läufe der Probanden werden in den Abbildungen 21 bis 23 dargestellt.

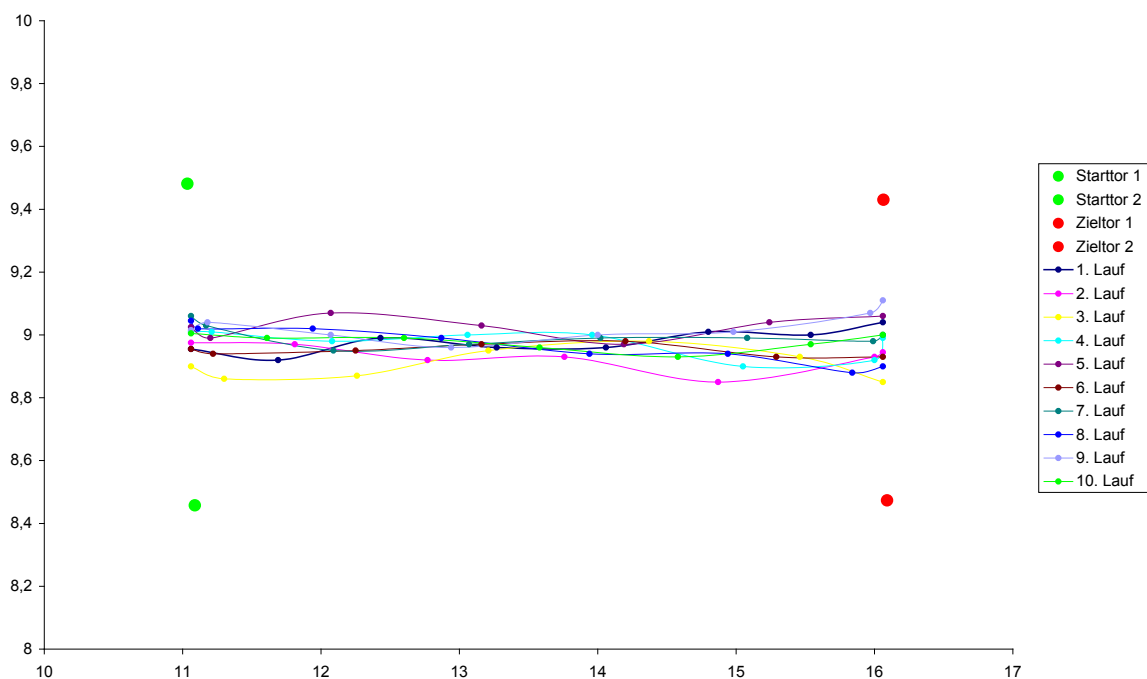


Abbildung 21: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell

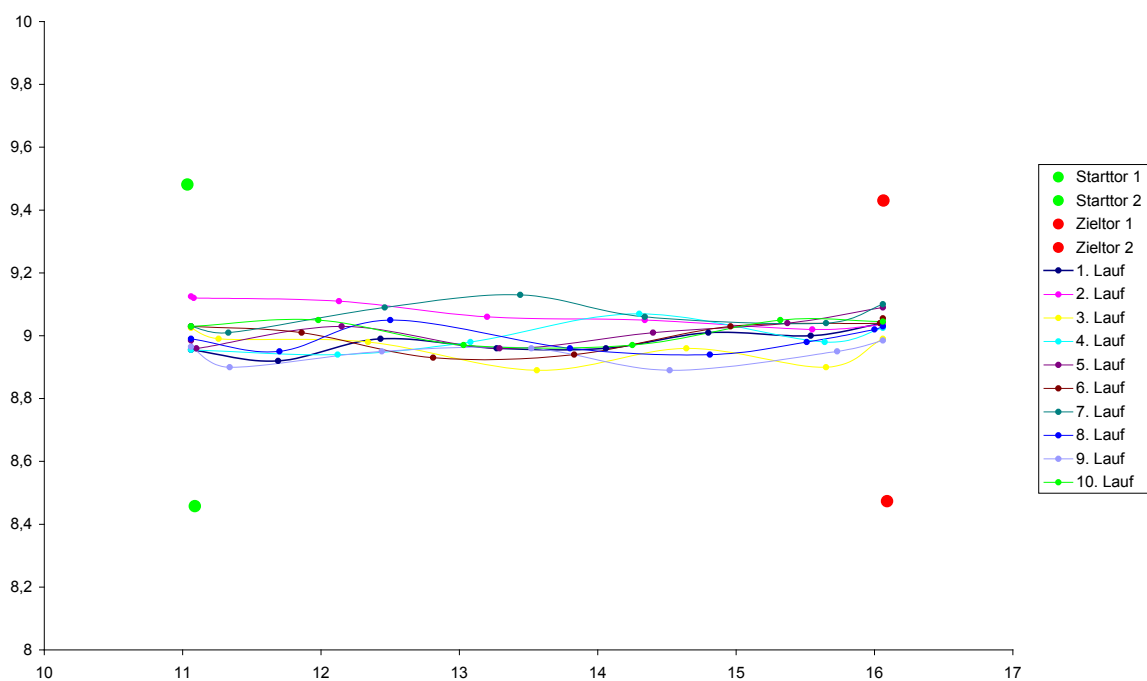


Abbildung 22: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell

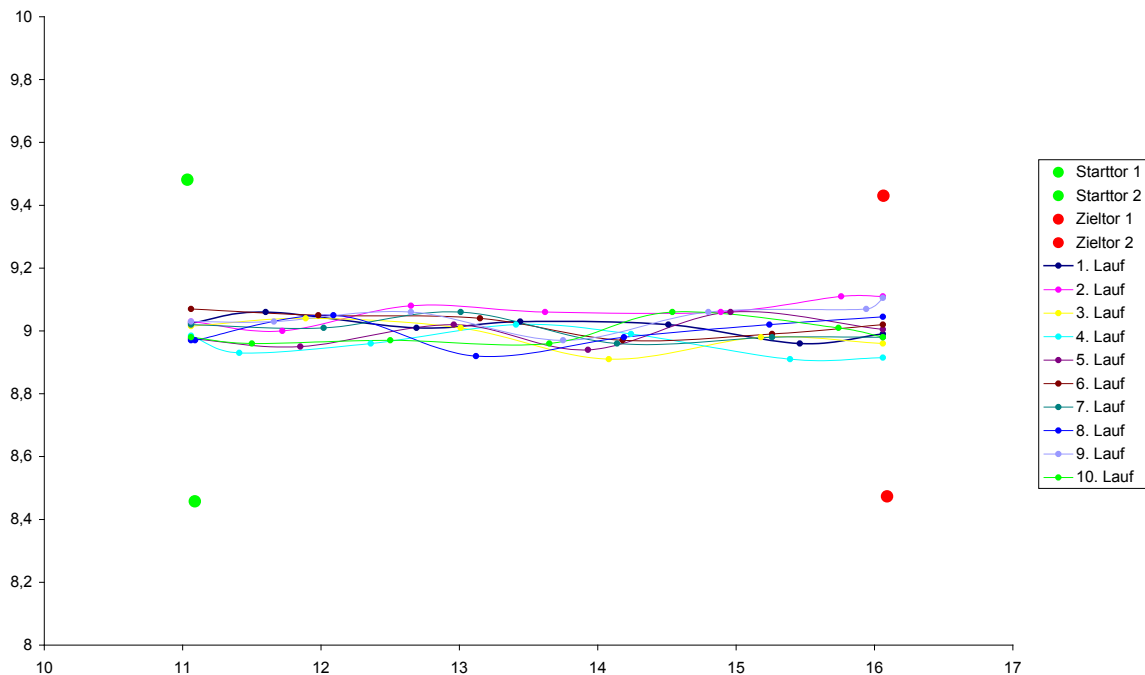


Abbildung 23: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell

Die Abbildungen 21 – 23 zeigen die Laufwegediagramme der Probanden bei den zehn Läufen. Die Datensätze der Messungen beim Laufparcours 5-m-Gerade bei der Geschwindigkeit „schnell“ zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer. Der Tag 025030 arbeitete ab dieser Messreihe mit einer Abtastrate von 4,2 Hz. Warum es zu einer Änderung der Abtastrate bei den vorigen Messungen gekommen ist, ist weiterhin unbekannt und die Ursache konnte nicht genauer eingegrenzt werden. Vergleicht man die Diagramme der drei verschiedenen Geschwindigkeitsstufen, so lässt sich eindeutig erkennen, wie die Positionsdatendichte durch die steigende Geschwindigkeit deutlich abnimmt. So bestehen die einzelnen Läufe der Stufe „schnell“ nur mehr aus sechs Positionsdaten pro Lauf. Dies ergibt ungefähr eine Messung pro gelaufenem Meter. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 12 ersichtlich. Die Daten zeigen hier lediglich eine geringe Überschätzung des zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel nur mehr $1,05 \pm 0,69$ cm. Dies ergibt bei der Streckenlänge von 5 m eine Abweichung von 0,2 %.

Tabelle 12: Auswertung Laufweg, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
schnell				
5m Gerade	500	$1,05 \pm 0,69$	0,22 bis 3,73	0,2

Ubisense überschätzt die Geschwindigkeit im Mittel um 0,62 km/h in diesem Geschwindigkeitsbereich. Die genauen Daten sind in Tabelle 13 ersichtlich. Somit zeigt sich im höchsten Geschwindigkeitsbereich eine deutlich größere Abweichung in den erfassten Daten.

Tabelle 13: Auswertung Geschwindigkeit, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell

Parcours	Auswertung Geschwindigkeit					r
	Geschwindigkeit Lichtschranke Mittel $\pm$ Standardabweichung	Geschwindigkeit Ubisense Mittel $\pm$ Standardabweichung	Abweichung Mittel $\pm$ Standardabweichung	TEE Raw	95% CI	
schnell 5m Gerade	16,07 $\pm$ 1,08	15,45 $\pm$ 0,95	0,62 $\pm$ 0,68 (-3,86% $\pm$ 4,2%)	0,61	0,48 – 0,82	0,78

5.2.2 45°-Richtungswechsel

Im Anschluss an den ersten Messaufbau 5-m-Gerade wurde der Laufparcours 45°-Richtungswechsel aufgebaut (Abbildung 24). Die Laufstrecke für diesen Parcours beträgt 10 m und beinhaltet einen Richtungswechsel von 45° nach 5 m. Die Startposition der Starttore blieb dabei gleich und der Bereich nach dem Richtungswechsel wurde zusätzlich aufgebaut. Bei diesem Aufbau mussten die Probanden darauf achten, beim Richtungswechsel den markierten Laufweg möglichst nicht zu verlassen. Der ideale Laufweg wurde auf dem Hallenboden erneut markiert und der Richtungswechsel mit einem Hütchentor gekennzeichnet.

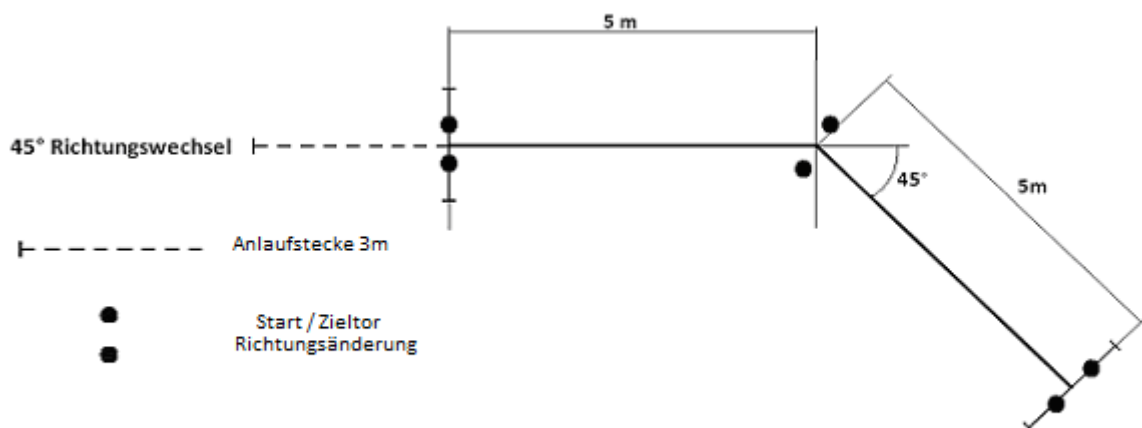


Abbildung 24: 45°-Richtungswechsel

5.2.2.1 Geschwindigkeit langsam

Zu Beginn der Datenaufzeichnung für den 45°-Richtungswechsel wurden die Probanden angewiesen, den Laufparcours innerhalb des Geschwindigkeitsbereichs von 2 bis 6 km/h zu absolvieren. Nach einer kurzen Übungs- und Eingewöhnungsphase absolvierte jeder Proband zehn Durchgänge in Folge, bevor der nächste Läufer/die nächste Läuferin an der Reihe war. In den folgenden Abbildungen 25 – 27 werden die zehn Läufe der einzelnen Probanden graphisch dargestellt.

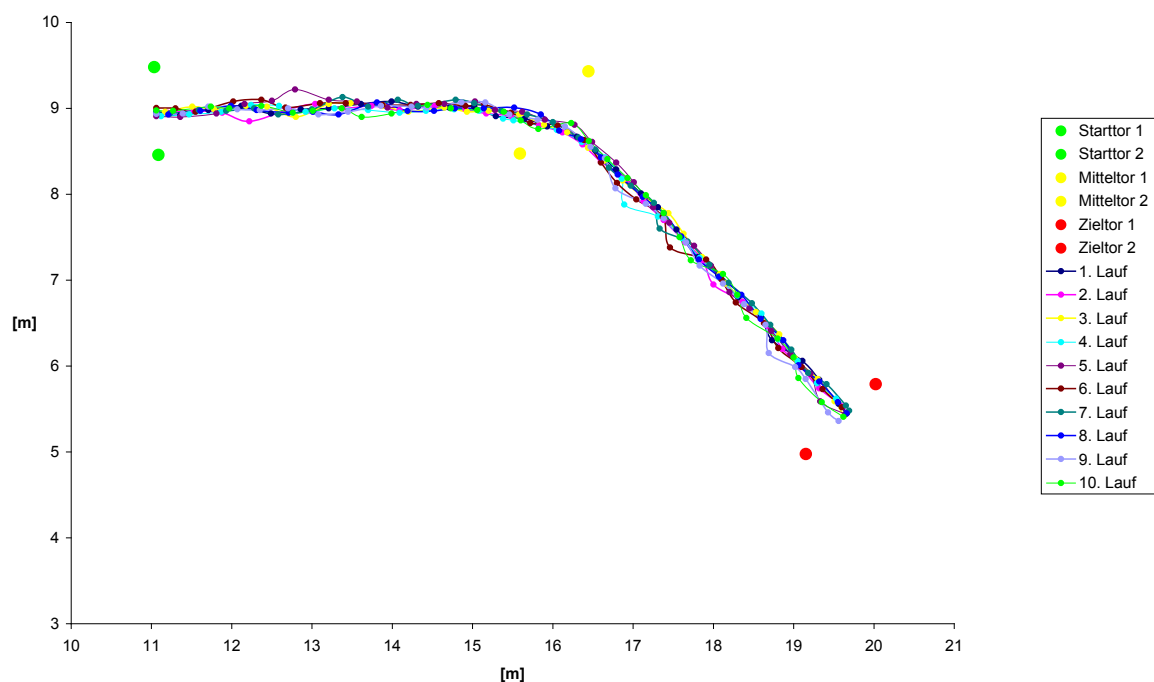


Abbildung 25: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

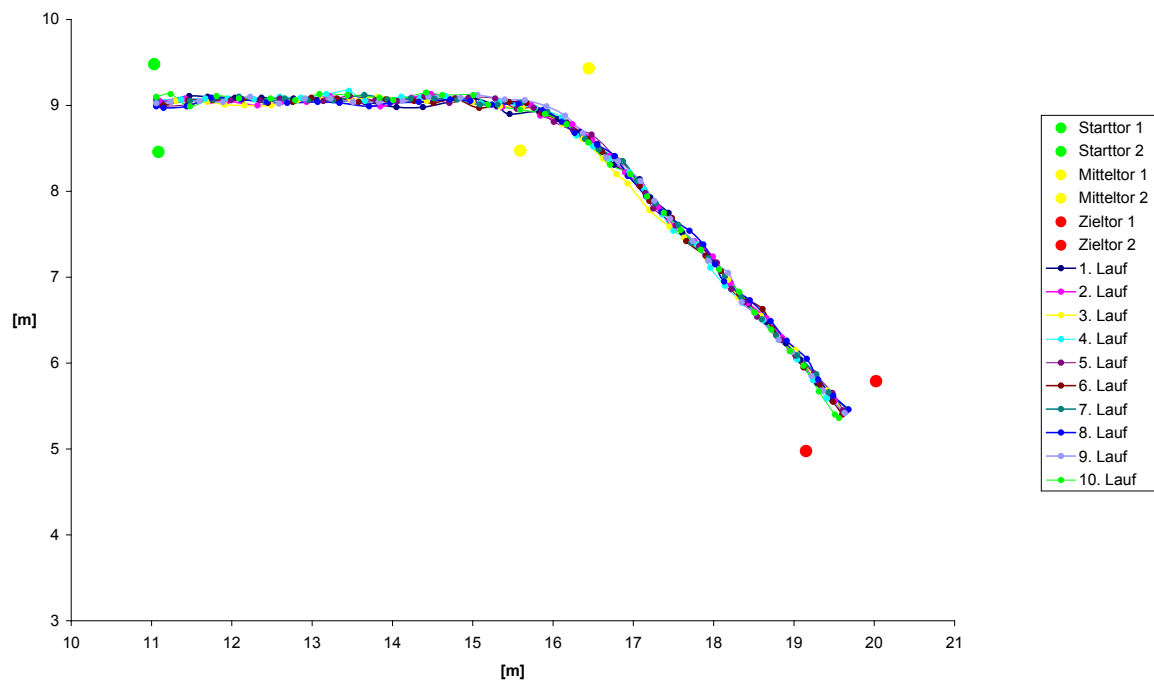


Abbildung 26: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

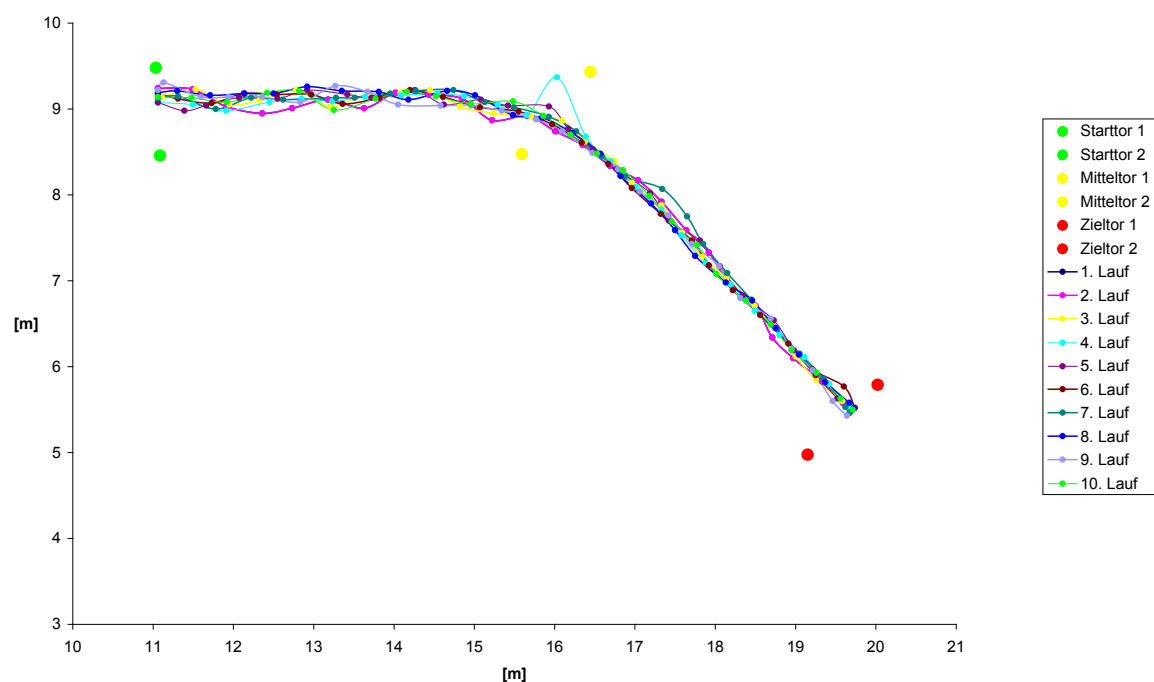


Abbildung 27: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Die oben dargestellten Laufwegediagramme zeigen die gesamten Läufe der Probanden im Geschwindigkeitsbereich „langsam“. Alle Datenpunkte sind hier innerhalb des gekennzeichneten Parcours innerhalb der Hütchentore. Die Datensätze der Messungen

zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer, lediglich Lauf vier bei Tag 031238 weist einen untypischen Datenpunkt auf. Dieser Lauf wurde mit dem aufgezeichneten Video kontrolliert. Auf dem Video ist keine Abweichung des Probanden von der Laufwegmarkierung ersichtlich. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 14 ersichtlich. Die Daten zeigen auch hier eine Überschätzung des zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt $11,6 \pm 5,42$ cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 10 m eine Abweichung von 1,16 %. Stellt man die Abweichungen des LPM-Systems (Frencken et al. 2010) gegenüber, so hatte dieses -8 ± 6 cm bzw. -0,8 %.

Tabelle 14: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
langsam				
45°	1000	$11,6 \pm 5,42$	-1,93 bis 22,32	1,16

Tabelle 15: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke Mittel $\pm$ Standardabweichung	Geschwindigkeit Ubisense Mittel $\pm$ Standardabweichung	Abweichung Mittel $\pm$ Standardabweichung	TEE Raw	95% CI	r
langsam						
45°	$5,34 \pm 0,75$	$5,38 \pm 0,75$	$0,035 \pm 0,03$ (0,66% $\pm$ 0,63%)	0,03	0,03 – 0,05	1

Tabelle 15 zeigt die Daten der Auswertung der Geschwindigkeit. Diese bestätigt dem Ubisense System eine sehr hohe Übereinstimmung mit dem Referenzsystem. So beträgt die Abweichung nur $0,035 \pm 0,03$ km/h.

5.2.2.2 Geschwindigkeit mittel

Nach einer kurzen Pause wurden die Probanden aufgefordert, den aktuellen Parcours in einem Geschwindigkeitsbereich von ca. 6,1 bis 11 km/h zu absolvieren. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase auf die neue Geschwindigkeit wurden die Daten wiederholt aufgezeichnet. Die Laufwegediagramme der einzelnen Probanden werden in den Abbildungen 28 - 30 dargestellt.

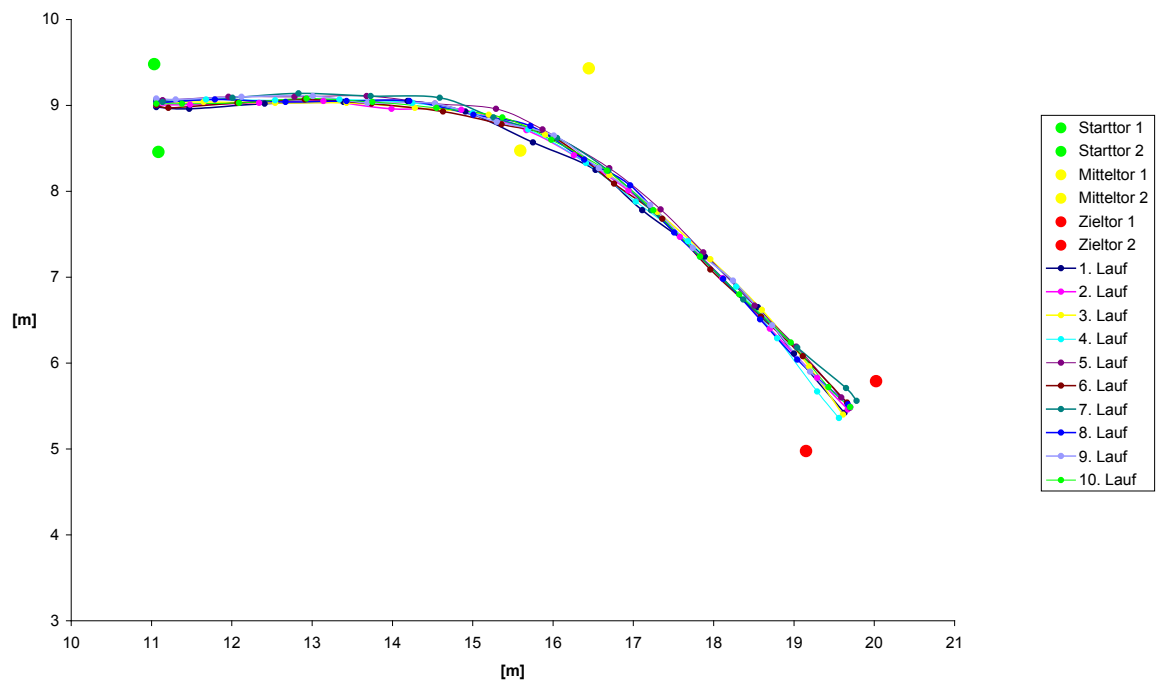


Abbildung 28: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

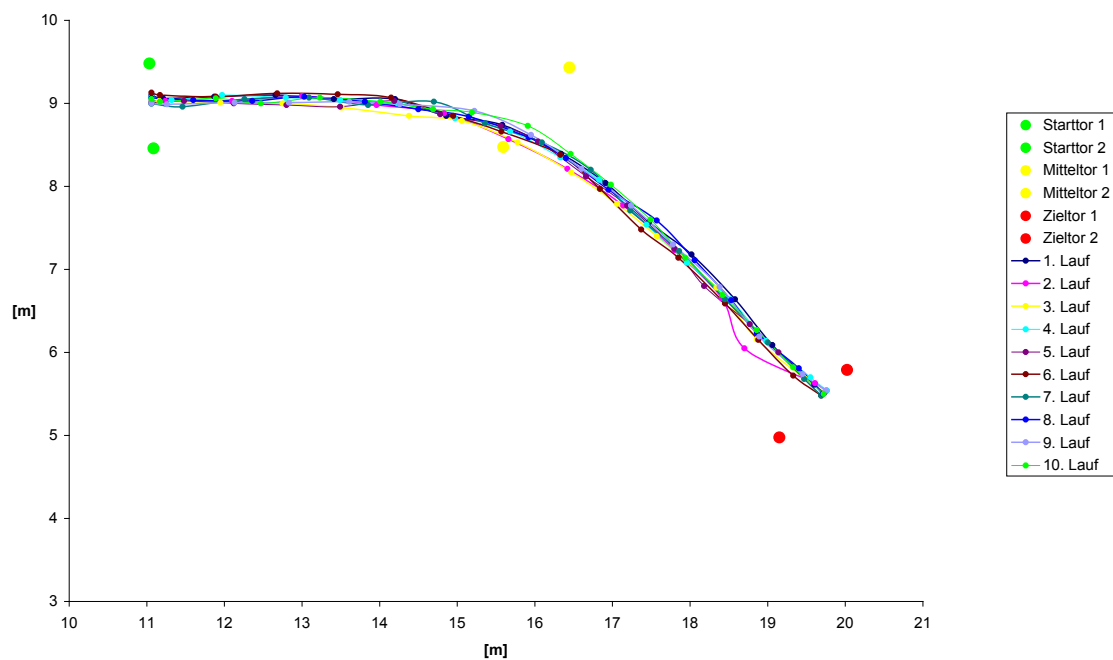


Abbildung 29: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

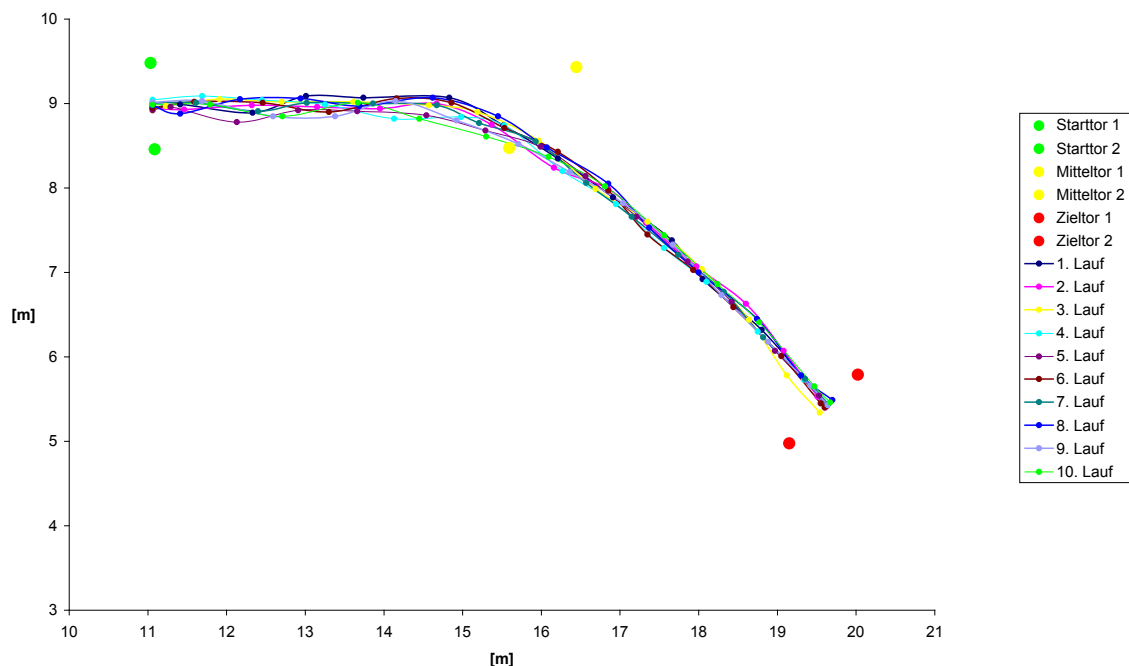


Abbildung 30: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

Laut dem Laufwegediagramm Tag 031238 in Abbildung 33 ist der Proband beim Richtungswechseltor sehr knapp am Hütchen gelaufen. Dies entspricht jedoch nicht dem gewünschten markierten Laufweg im Bereich der Tormitte. Eine Kontrolle mit dem aufgezeichneten Videomaterial zeigt hier keine nennenswerte Abweichung des Probanden zum geforderten Laufweg. Es zeigt sich bei allen drei Probanden die Tendenz des *Schneidens* der Richtungsänderung bei steigender Geschwindigkeit. Dies wird mit einer Schwerpunktverschiebung und somit einer Seitneigung des Körpers erklärt. Bei der Torbreite von einem Meter entspricht die Abweichung von der gewünschten Ideallinie im Bereich der Richtungsänderung ungefähr 40 cm. So berichten Hof, Gazendam und Sinke (2005) bereits von einem Schwanken des Körperschwerpunktes in der Größenordnung von 5 mm unter Laborbedingungen auf der Kraftmessplatte. Dies ist zwar noch keine Erklärung für die große Abweichung vom gewünschten Laufweg, jedoch ein Indiz dafür das es durch die Schwerpunktsverlagerung der Probanden zu einer Abweichung im Bereich der Richtungsänderung kommen kann.

Die Datensätze bei dieser Geschwindigkeitsstufe zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer und konnten für weitere Berechnungen herangezogen werden. Die Daten der statistischen Auswertung der Laufwege dieser Geschwindigkeitsstufe sind in Tabelle 16 ersichtlich. Die Daten zeigen hier im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen eine Unterschätzung des Laufweges. Die

Abweichung beträgt hierbei – 1,49 %, dies entspricht im Mittel – 14,85 cm. Vergleicht man die Laufwegdiagramme der beiden Geschwindigkeitsstufen, so ist bereits bei dieser Geschwindigkeit eine Laufwegverkürzung erkennbar. Wie schon zuvor beschrieben, müssen die Probanden mit steigender Geschwindigkeit verstärkt den Körper zur Kurveninnenseite neigen, um die Richtungsänderung absolvieren zu können. Dies führt dazu, dass der am Kopf platzierte Ubitag einen kürzeren Weg absolviert, als er dem am Boden markierten gewünschten Laufweg entspricht.

Tabelle 16: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Laufweg					
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %	
		Mittel ± Standardabweichung	min – max		
mittel					
45°	1000	-14,85 ± 3,76	-22,27 bis -7,95	-1,49	

In Tabelle 17 mit den Daten zur Auswertung der Geschwindigkeit zeigt sich ebenfalls ein ähnliches Bild. Durch den verkürzt aufgezeichneten Laufweg ergibt sich eine niedrigere Geschwindigkeit. Die Abweichung beträgt – 0,47 km/h im Mittel. Im Vergleich dazu betrug diese bei der Geschwindigkeitsstufe *langsam* 0,035 km/h.

Tabelle 17: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubitsense	Abweichung	TEE		
	Mittel ± Standardabweichung	Mittel ± Standardabweichung	Mittel ± Standardabweichung	Raw	95% CI	r
mittel						
45°	12,21 ± 0,79	11,73 ± 0,83	-0,47 ± 0,18 (-3,88% ± 1,45%)	0,18	0,14 – 0,24	0,98

5.2.2.3 Geschwindigkeit schnell

Zuletzt galt es, den Parcours *45° Richtungswechsel* im Geschwindigkeitsbereich über 11 km/h *schnell* zu absolvieren. Die Probanden hatten erneut die Möglichkeit, sich auf die Geschwindigkeit einzustellen. Nach dieser kurzen Eingewöhnungsphase auf die neue Geschwindigkeit wurden die Daten erneut aufgezeichnet. Die gesamten Läufe der Probanden werden in den Abbildungen 31 - 33 dargestellt.

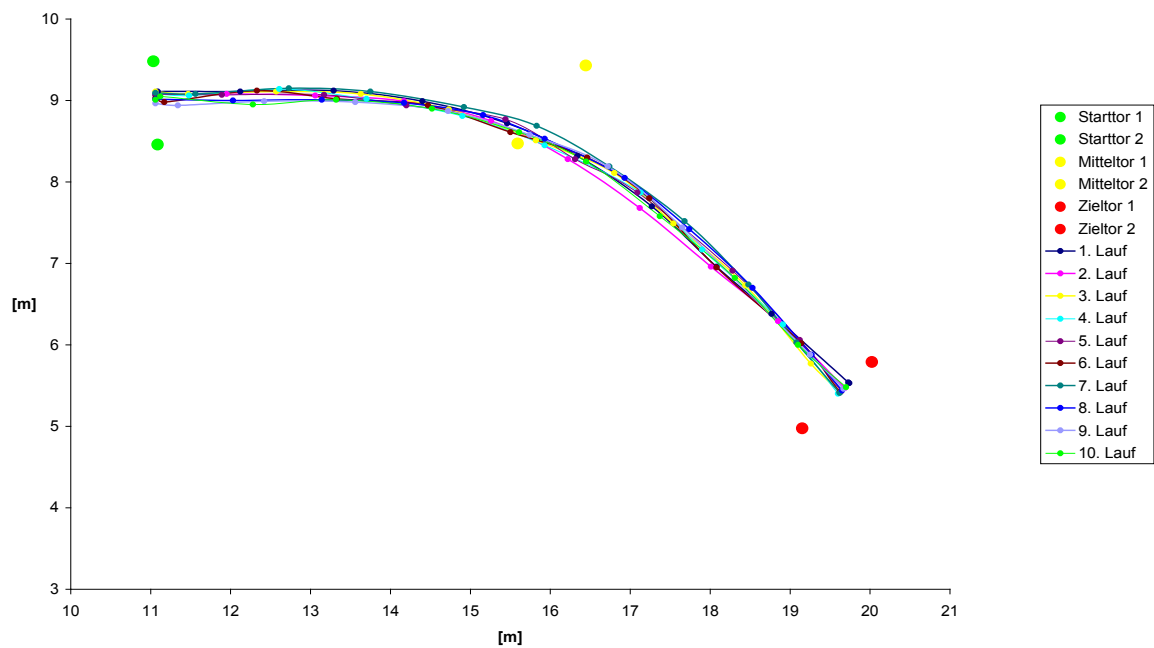


Abbildung 31: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

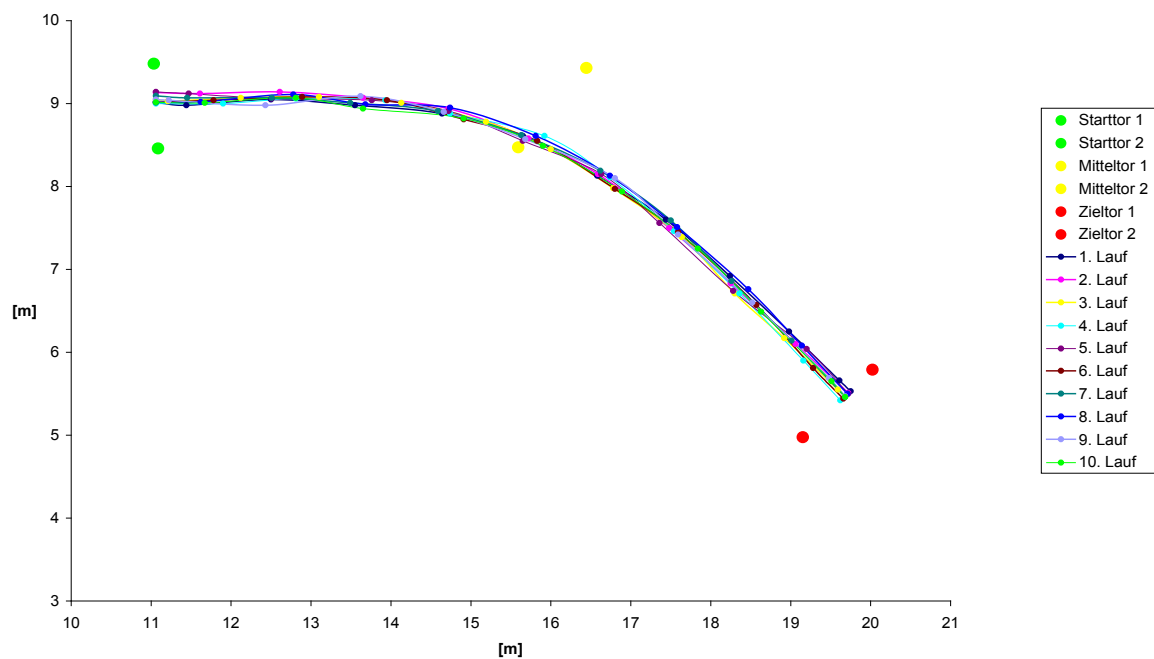


Abbildung 32: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

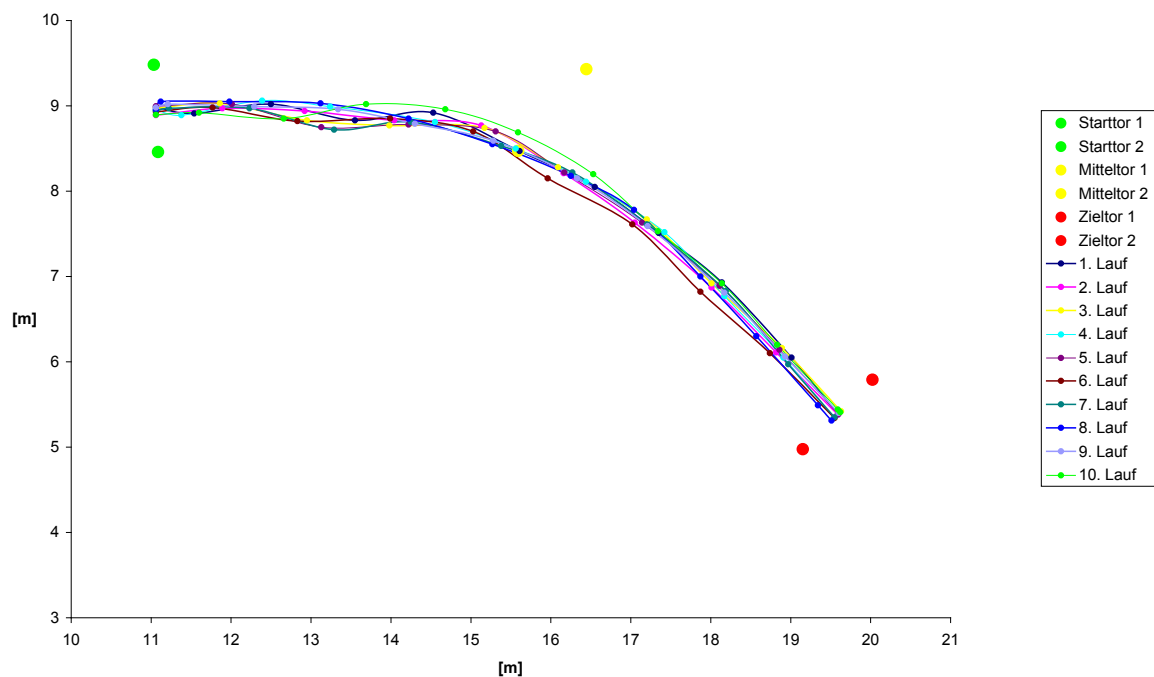


Abbildung 33: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Die oben abgebildeten Laufwegediagramme zeigen bei der höchsten Geschwindigkeitsstufe bereits alle ein deutliches *Schneiden* der Richtungsänderung. Die Ursache dafür wurde bereits in Kapitel 5.2.2.2 erklärt, die Auswirkungen werden jedoch mit steigender Geschwindigkeit noch deutlicher. Laut Abbildung 36 befinden sich einige Positionsdaten bereits über den Hütchen für die Richtungsänderung. Auf dem aufgezeichneten Videomaterial lässt sich dies jedoch nicht eindeutig erkennen. Die Datensätze bei dieser Geschwindigkeitsstufe zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer und konnten für weitere Berechnungen herangezogen werden. Die Daten der statistischen Auswertung der Laufwege dieser Geschwindigkeitsstufe sind in Tabelle 18 ersichtlich. Die Daten zeigen hier im Vergleich zu der vorangegangenen Messung eine etwas höhere Abweichung des Laufweges. Die Abweichung beträgt hierbei -2,16 %, dies entspricht $-21,57 \pm 4,83$ cm. Im Vergleich dazu zeigte das LPM-System eine Abweichung von -6 ± 9 cm bzw. -0,6 % (Frencken et al. 2010).

Tabelle 18: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
schnell				
45°	1000	$-21,57 \pm 4,83$	-33,57 bis -12,23	-2,16

Bei der Auswertung der gemessenen Geschwindigkeit zeigt sich auch eine höhere Abweichung zur Kontrollmessung mittels Lichtschrankensystem. Betrug die Abweichung bei der Stufe *mittel* -0,47 km/h, so beträgt diese nun -0,56 km/h im Mittel. Die gesamte Auswertung ist in Tabelle 19 ersichtlich.

Tabelle 19: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Parcours	Auswertung Geschwindigkeit					r
	Geschwindigkeit Lichtschanke Mittel $\pm$ Standardabweichung	Geschwindigkeit Ubisense Mittel $\pm$ Standardabweichung	Abweichung Mittel $\pm$ Standardabweichung	TEE Raw	95% CI	
schnell 45°	16,82 $\pm$ 0,73	16,26 $\pm$ 0,75	-0,56 $\pm$ 0,32 (-3,32% $\pm$ 1,9%)	0,32	0,25 – 0,43	0,91

5.2.3 90°-Richtungswechsel

Nach Abschluss aller Läufe des Laufparcours *45°-Richtungswechsel* wurde im Anschluss der Parcours *90°-Richtungswechsel* aufgebaut. Die Laufstrecke für diesen Parcours beträgt ebenfalls 10 m und beinhaltet einen Richtungswechsel von 90° nach 5 m. Die Startposition der Starttore blieb bestehen, lediglich der Richtungswechsel wurde von 45° auf 90° umgebaut und das Zieltor neu positioniert. Der gewünschte Laufweg wurde auf dem Hallenboden erneut markiert.

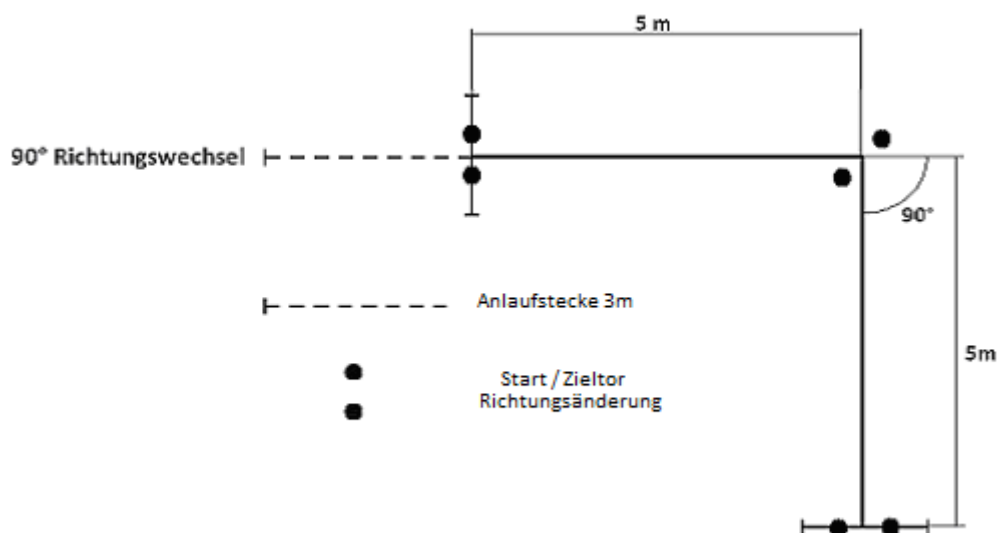


Abbildung 34: 90°-Richtungswechsel

Bei diesem Parcours zeigten sich erste Probleme bei der Laufgeschwindigkeit. Die zuvor gelaufenen Tempi konnten hier nicht mehr umgesetzt werden, da ein Absolvieren des Parcours mit einer Geschwindigkeit von ca. 16 km/h nicht mehr entlang des gewünschten Laufweges möglich war. Somit wurde die Geschwindigkeitsstufe „schnell“ mit ca. 13 km/h

durchgeführt, um die Laufwege der Probanden nicht zu stark vom markierten Weg abweichen zu lassen.

5.2.3.1 Geschwindigkeit langsam

Zu Beginn der Datenaufzeichnung für den 90°-Richtungswechsel wurden die Probanden aufgefordert, den Laufparcours innerhalb des Geschwindigkeitsbereichs von 2 bis 6 km/h (langsam) zu absolvieren. In den folgenden Abbildungen 35 – 37 werden die zehn Läufe der einzelnen Probanden graphisch dargestellt.

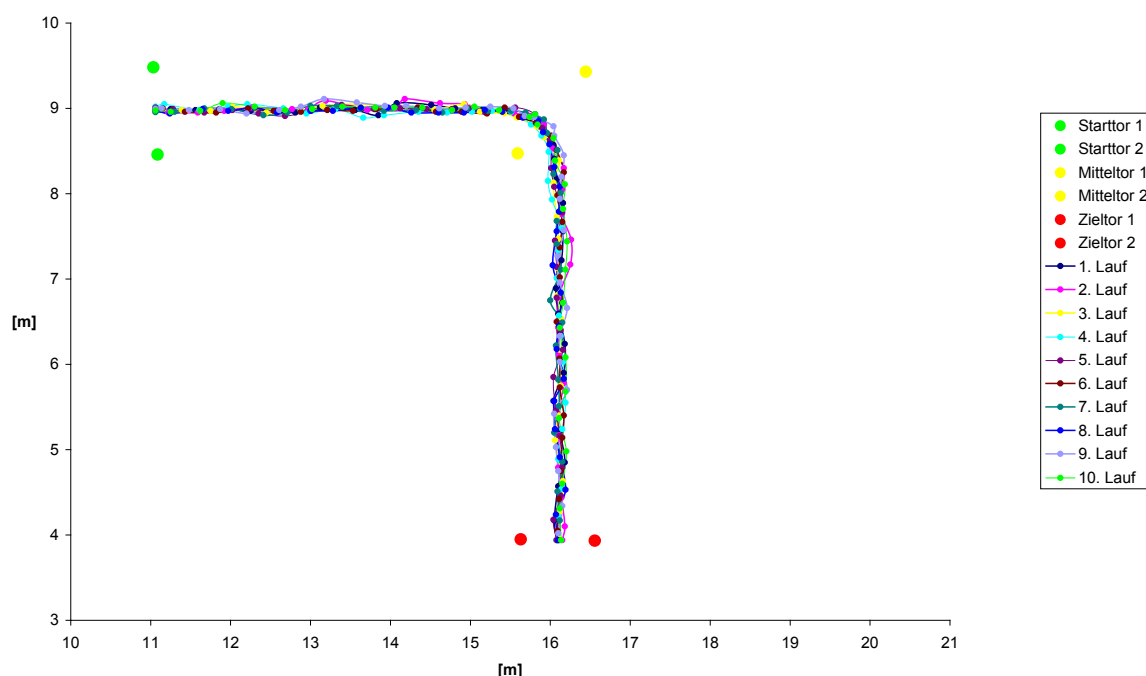


Abbildung 35: 10 Läufe, Tag 025030, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

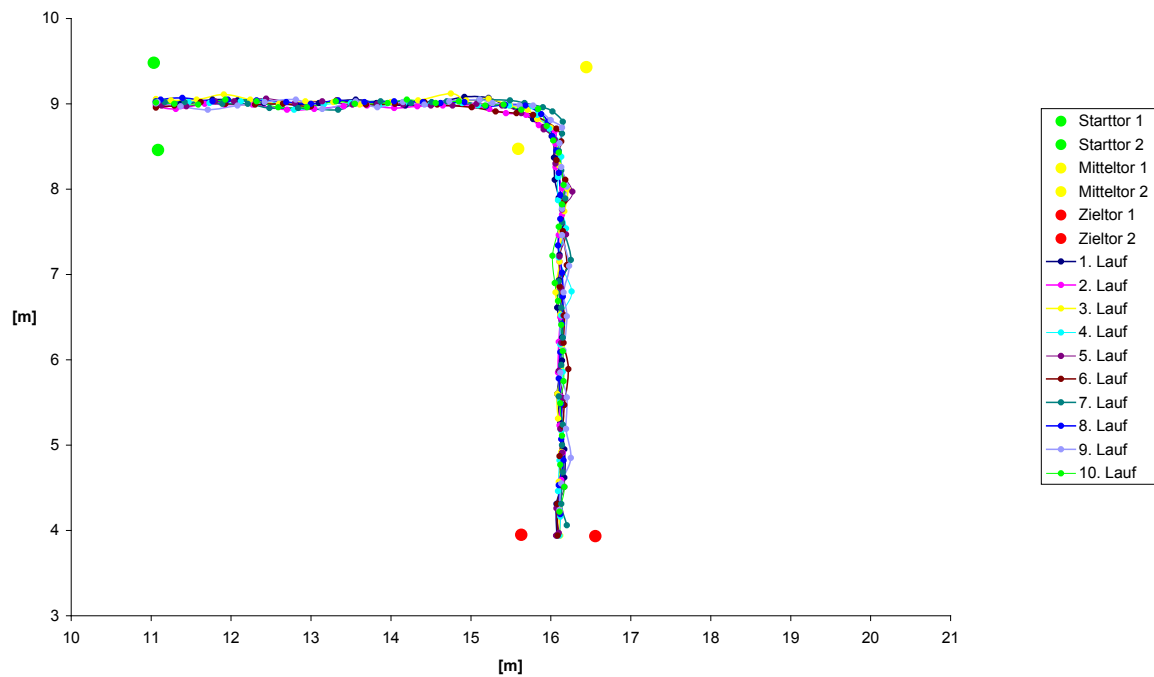


Abbildung 36: 10 Läufe, Tag 028214, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

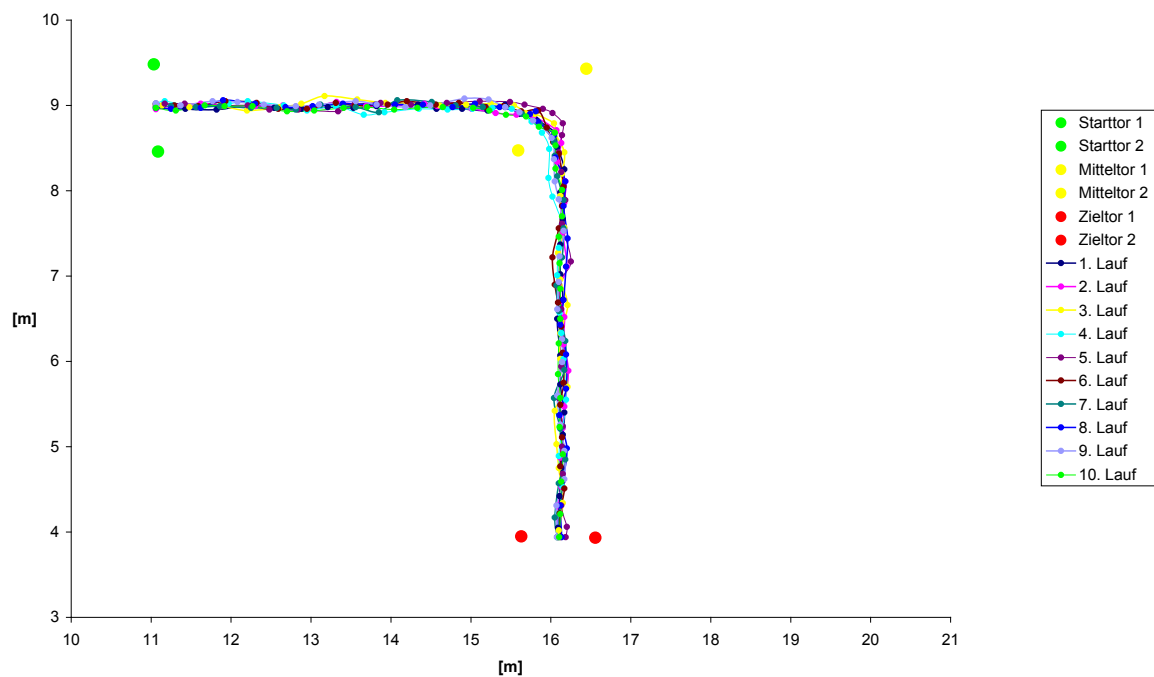


Abbildung 37: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Die oben dargestellten Laufwegediagramme zeigen die gesamten Läufe der Probanden beim Geschwindigkeitsbereich „langsam“. Alle Datenpunkte liegen nahe dem

gezeichneten Laufweg des Parcours. Im Bereich der Richtungsänderung sind ebenfalls alle Positionsdaten des Ubisense-Systems innerhalb des Hütchentores. Die Datensätze der Messungen zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer und konnten somit alle für weitere Berechnungen verwendet werden. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 20 ersichtlich. Die Daten zeigen hier eine Unterschätzung des zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel ca. $-7,3 \pm 9,25$ cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 10 m eine Abweichung von $-0,73$ %. Im Vergleich dazu lag das LPM-System bei Frencken et al. (2010) bei -6 ± 10 cm bzw. $-1,6$ %.

Tabelle 20: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
langsam 90°	1000	$-7,3 \pm 9,25$	-22,52 bis 11,13	-0,73

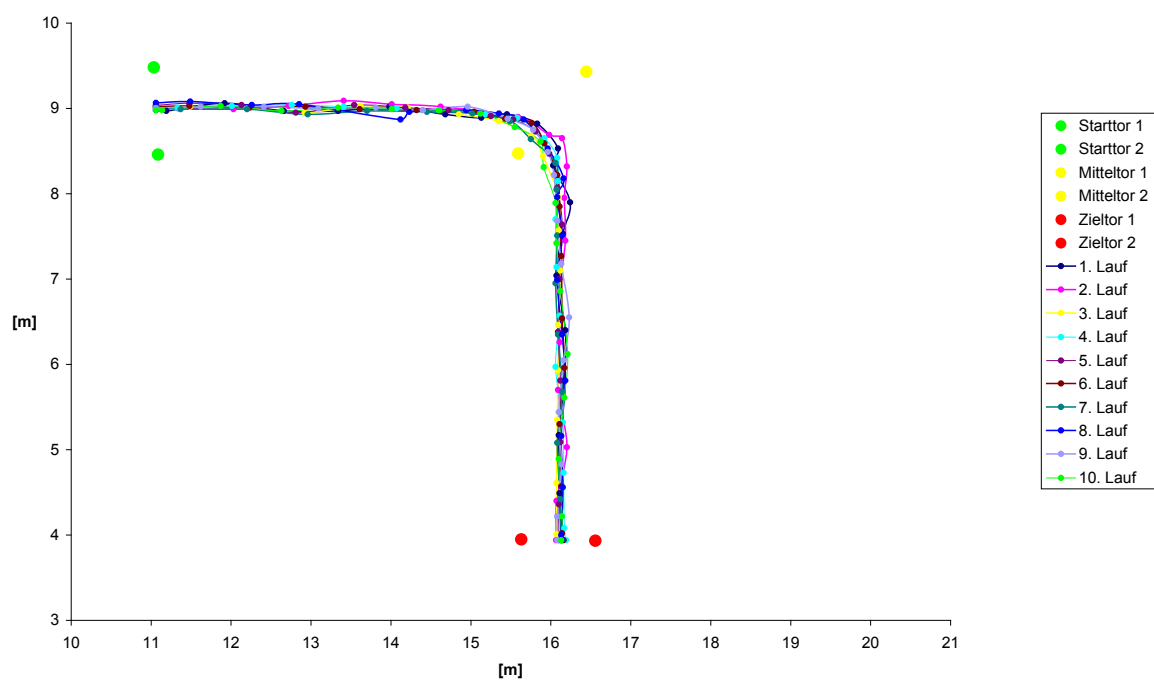
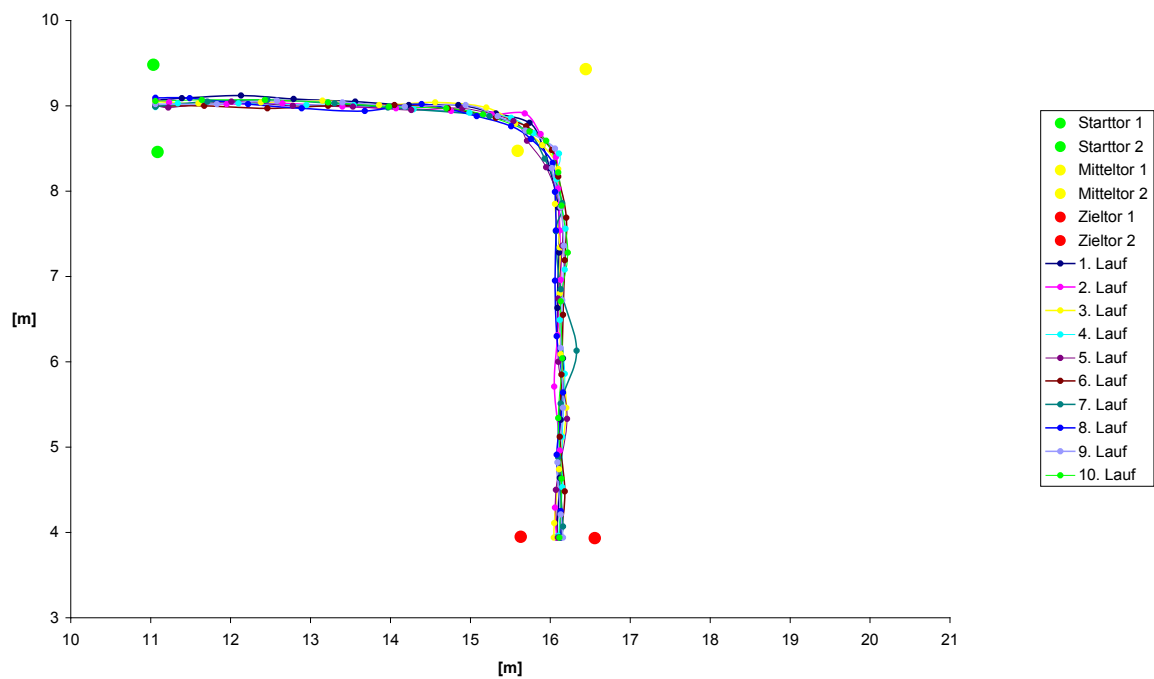
Die Daten der Geschwindigkeitsauswertung hierzu sind in Tabelle 21 dargestellt. Das Positionserfassungssystem unterschätzt die Geschwindigkeit um $-0,05$ km/h ($-1,06$ %).

Tabelle 21: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE		
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw	95% CI	r
langsam 90°	$4,75 \pm 0,14$	$4,7 \pm 0,14$	$-0,05 \pm 0,05$ ($-1,06\% \pm 1,14\%$)	0,06	0,04 – 0,07	0,93

5.2.3.2 Geschwindigkeit mittel

Wie bereits bei den vorigen Testaufbauten wurden die Probanden auf den neuen Geschwindigkeitsbereich mit Übungsläufen eingewöhnt. Es galt, den Parcours nun wieder im Geschwindigkeitsbereich *mittel*, dies bedeutet mit ca. 6 bis 11 km/h, zu absolvieren. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase auf die neue Geschwindigkeit wurden die Daten erneut aufgezeichnet. Die Laufwegediagramme der einzelnen Probanden werden in den Abbildungen 38 - 40 dargestellt.



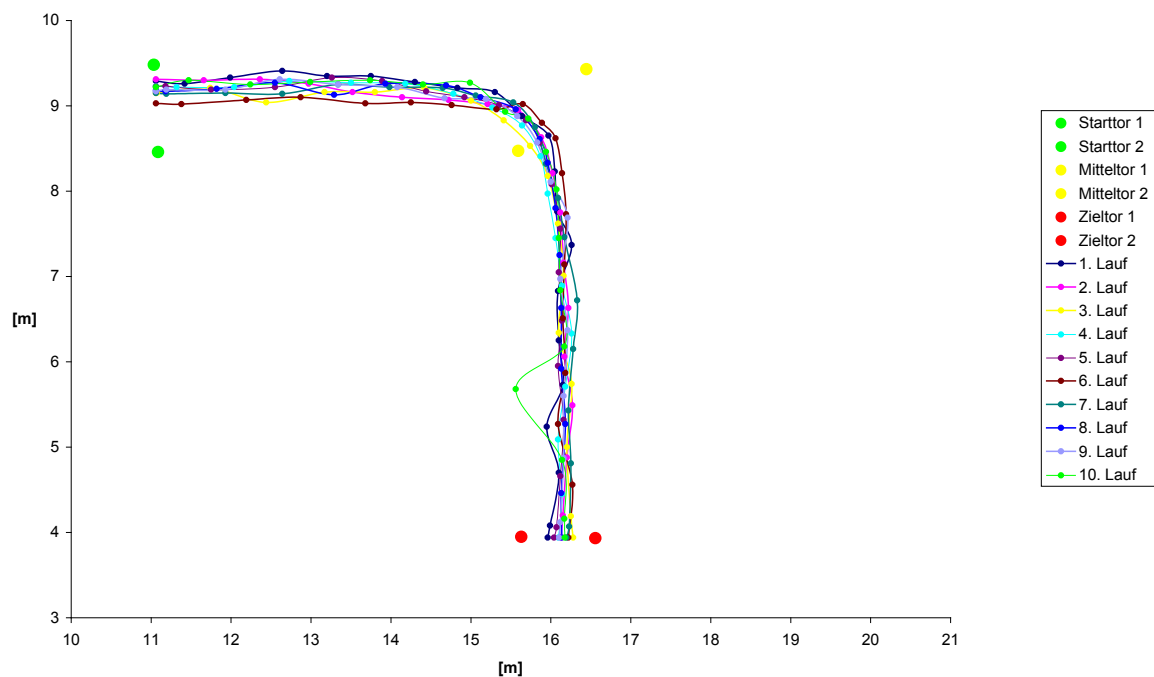


Abbildung 40: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

In Abbildung 40 lässt sich bei Lauf zehn ein ungewöhnlicher Messpunkt kurz vor dem Zieltor erkennen. Dieser Lauf wurde mittels des aufgezeichneten Videos kontrolliert. Auf dem Video ist keine Abweichung des Probanden von der Laufwegmarkierung ersichtlich. Die Läufe des Tags 031238 (ersichtlich in Abbildung 40) weisen im Vergleich zu den anderen zwei Abbildungen 38 und 39 auch eine ungewöhnlich große Streuung der einzelnen Laufwege auf. Auch hier zeigt das Kontrollvideo keine deutlichen Unterschiede der jeweiligen Läufe. Warum es zu solchen Datenausreißern kommt bzw. warum die einzelnen Läufe weiter getrennt aufgezeichnet wurden, konnte bis dato noch nicht geklärt werden. Erfreulich ist, dass alle Messpunkte im Bereich des Richtungsstores innerhalb der Hütchen liegen. Beim Parcours 45°-Richtungswechsel bei der Geschwindigkeitsstufe „mittel“ gab es bereits einige Messpunkte außerhalb der Tore. Dies wird mit dem etwas niedriger gewählten Tempo erklärt. Wurden beim Parcours 45°-Richtungswechsel bei dieser Geschwindigkeitsstufe durchschnittlich 12 km/h gelaufen, so wurden hier 9 km/h gewählt. Dies war notwendig, um eine weitere Steigerung für die Stufe „schnell“ zu ermöglichen, da diese Richtungsänderung nicht mit den gewohnten 16 km/h absolvierbar ist. Die weiteren Datensätze bei dieser Geschwindigkeitsstufe zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer und konnten für weitere Berechnungen herangezogen werden. Die Daten der statistischen Auswertung der Laufwege dieser Geschwindigkeitsstufe sind in Tabelle 22 ersichtlich. Die Daten zeigen hier im Vergleich

zu der vorangegangenen Messung eine höhere Abweichung des Laufweges. Die Abweichung beträgt hierbei -2,77 %, dies entspricht im Mittel $-27,68 \pm 14,17$ cm.

Tabelle 22: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
mittel				
90°	1000	$-27,68 \pm 14,17$	-43,73 bis 25,94	-2,77

Die Auswertung der Geschwindigkeit in Tabelle 23 zeigt ein ähnliches Bild. Betrug die Abweichung beim Tempo „langsam“ noch 0,05 km/h, so beträgt diese bei der aktuellen Geschwindigkeitsstufe bereits 0,37 km/h im Mittel. Die Werte für die Geschwindigkeit des Ubisense-Systems liegen unter denen des LPM-Systems der Studie bei Frencken et al. (2010).

Tabelle 23: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE		
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw	95% CI	r
mittel						
90°	$9,2 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,46$	$-0,37 \pm 0,23$ (-4,1% $\pm$ 2,5%)	0,21	0,16 – 0,28	0,89

5.2.3.3 Geschwindigkeit schnell

Zuletzt galt es, diesen Parcours in der Stufe *schnell* zu absolvieren. Wie bereits in den vorigen Kapiteln erwähnt, wurden die zu laufenden Geschwindigkeiten für diesen Parcours ein wenig reduziert, da sonst ein sauberes Durchlaufen des Parcours nicht möglich gewesen wäre. Die Probanden hatten erneut eine Gewöhnungsphase für die erhöhte Geschwindigkeit und konnten sich mit Übungsläufen auf die Messungen vorbereiten. Hierbei zeigte sich, dass bei Geschwindigkeiten über 13 km/h die Probanden deutliche Probleme hatten, auf dem markierten Laufweg zu bleiben. Um keine zu großen Abweichungen vom gewünschten Laufweg zu bekommen, wurde die Stufe „schnell“ nur mit einem Tempo bis ungefähr 13 km/h gelaufen. Die Laufwegediagramme der einzelnen Probanden werden in den Abbildungen 41 - 43 dargestellt.

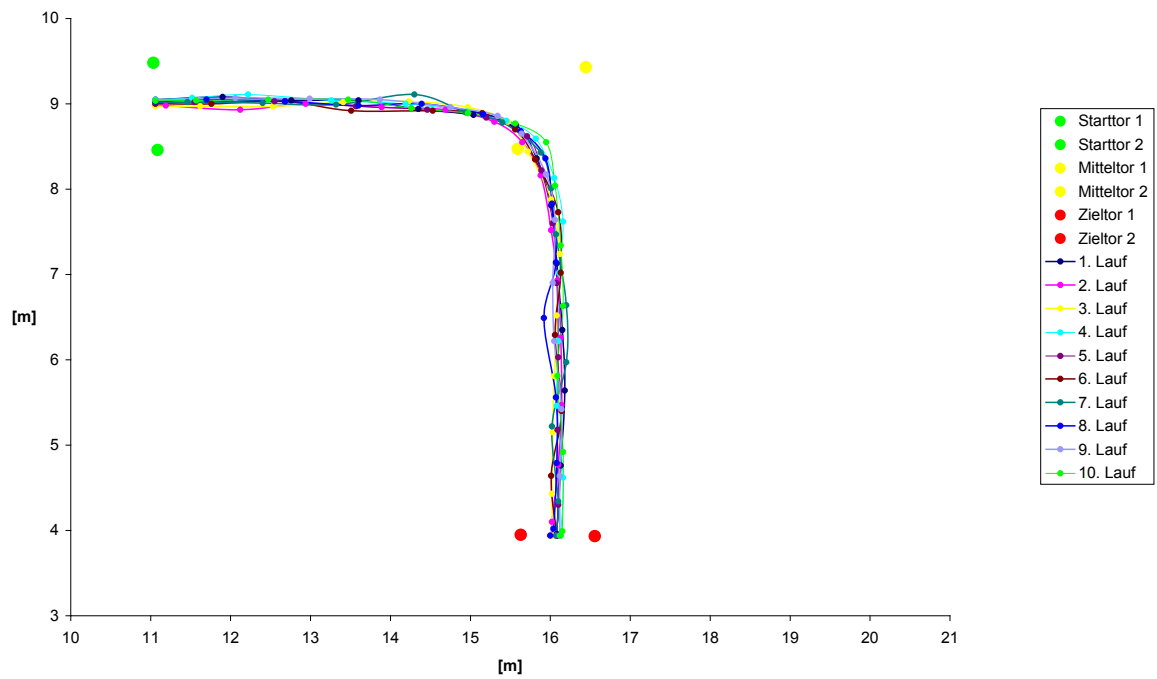


Abbildung 41: 10 Läufe, Tag 025030, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

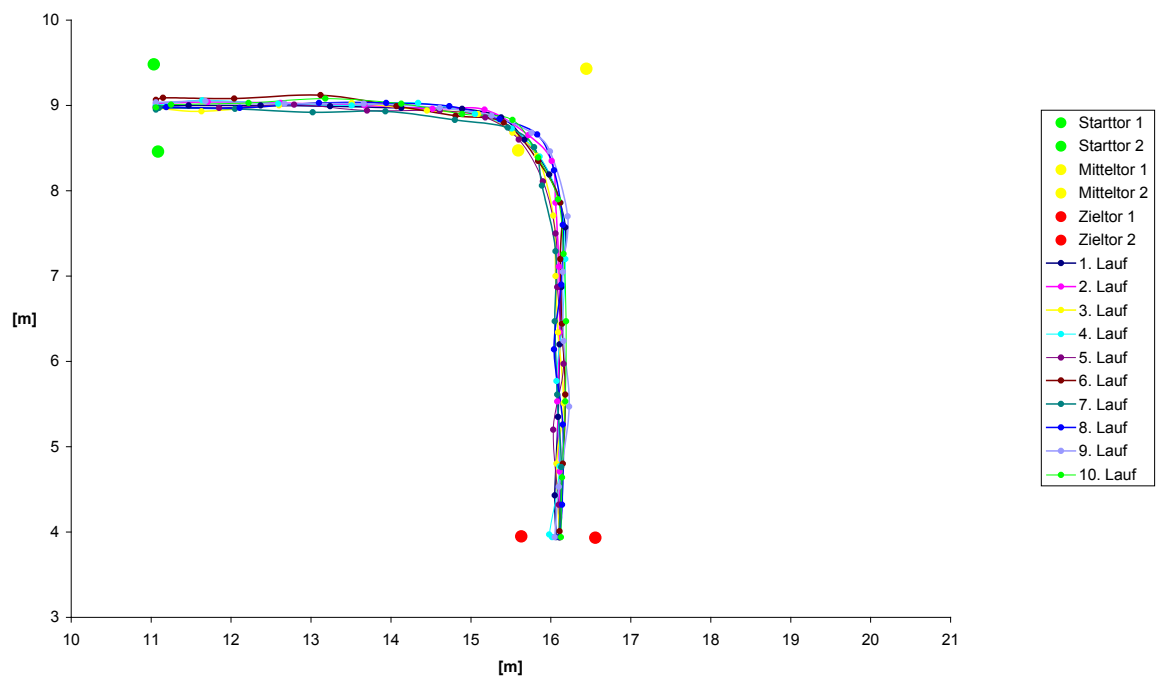


Abbildung 42: 10 Läufe, Tag 028214, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

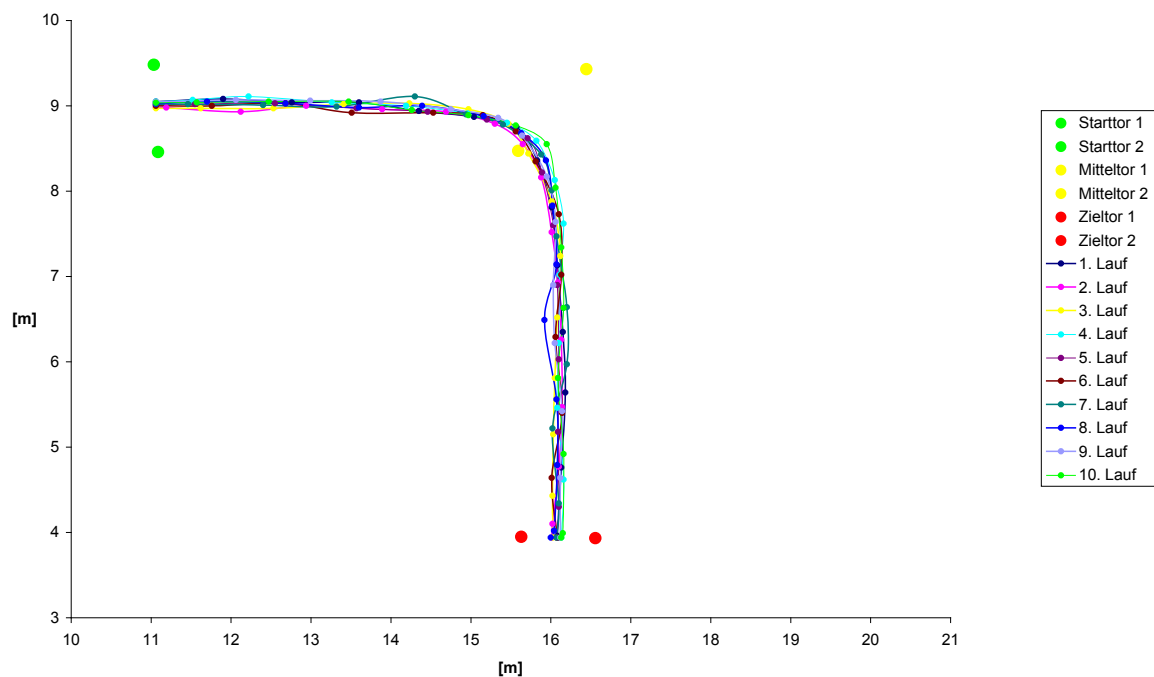


Abbildung 43: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Die oben dargestellten Laufwegediagramme zeigen die gesamten Läufe der Probanden im Geschwindigkeitsbereich *schnell*. Alle Datenpunkte liegen nahe dem gekennzeichneten Laufweg des Parcours. Im Bereich der Richtungsänderung sind ebenfalls alle Positionsdaten des Ubisense-Systems innerhalb des Hütchentores. Die Datensätze der Messungen zeigen keine ungewöhnlichen Messfehler bzw. Datenausreißer und konnten somit alle für weitere Berechnungen verwendet werden. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 24 ersichtlich. Die Daten zeigen hier eine Unterschätzung des zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel ca. -51,77 cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 10 m eine Abweichung von -5,18 %. Vergleicht man die aufgezeichneten Laufwege der unterschiedlichen Tempi dieses Parcours, so zeigt sich die Tendenz einer höheren Unterschätzung des Laufweges mit steigender Geschwindigkeit. Die Daten zeigen auch, dass mit stärkerer Richtungsänderung der Fehler ebenfalls zunimmt.

Tabelle 24: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
schnell				
90°	1000	-51,77 $\pm$ 7,55	-70,31 bis -36,83	-5,18

Tabelle 25: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell

Parcours	Auswertung Geschwindigkeit					
	Geschwindigkeit Lichtschranke Mittel $\pm$ Standardabweichung	Geschwindigkeit Ubisense Mittel $\pm$ Standardabweichung	Abweichung Mittel $\pm$ Standardabweichung	TEE Raw	95% CI	r
schnell 90°	12,39 $\pm$ 0,47	11,49 $\pm$ 0,4	-0,91 $\pm$ 0,19 (-7,36% $\pm$ 1,57%)	0,17	0,13 – 0,23	0,91

Die Auswertung der Geschwindigkeit (Tabelle 25) zeigt ein ähnliches Bild. Betrug die Abweichung bei Tempo langsam 0,05 km/h und bei mittel -0,37 km/h, so beträgt diese bei der aktuellen Geschwindigkeitsstufe bereits -0,91 km/h im Mittel.

5.2.4 Langer Parcours mit 45°- und 90°-Richtungswechseln (25 m)

Als letzter Messaufbau folgte der lange Parcours mit verschiedenen Richtungswechseln auf einer Länge von 25 m. Dieser Parcours wurde über fast die gesamte Hallenlänge aufgebaut und ist somit auch sehr gut dafür geeignet, das Ubisense-System über die ganze Hallenfläche zu testen. Die Laufstrecke für diesen Parcours beträgt 25 m und beinhaltet einen 90°-Richtungswechsel nach 5 m, einen weiteren 90°-Richtungswechsel nach 5 m, gefolgt von zwei 45°-Richtungswechseln nach je 5 m. Der gewünschte Laufweg wurde auf dem Hallenboden markiert.

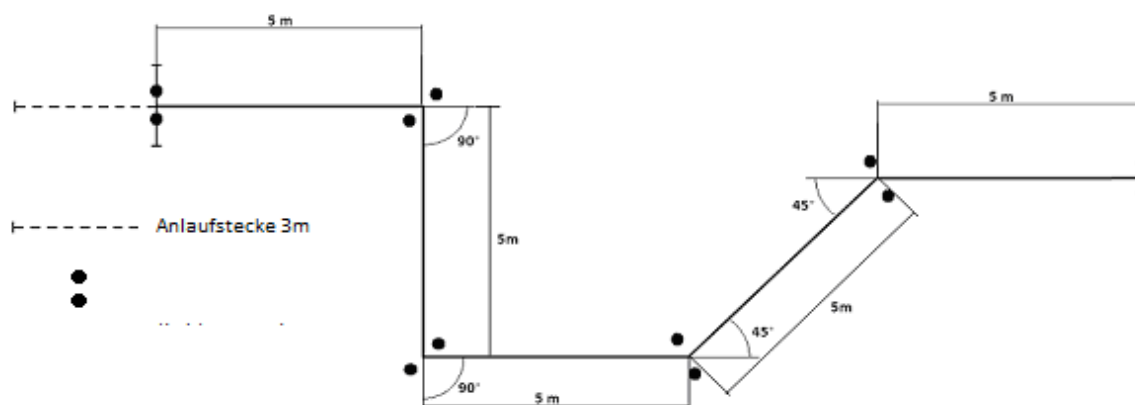


Abbildung 44: Langer Parcours mit 45°- und 90°-Richtungswechseln, Länge 25 m

5.2.4.1 Geschwindigkeit langsam

Zu Beginn der Datenaufzeichnung für den langen Parcours wurden die Daten für den Geschwindigkeitsbereich von 2 bis 6 km/h (*langsam*) aufgezeichnet. Wie bereits bei allen anderen Parcours gab es für die Probanden eine Eingewöhnungsphase auf den neuen

Parcours bzw., um die zu laufende Geschwindigkeit zu testen. Die Probanden wurden erneut darauf hingewiesen, dem markierten Laufweg möglichst genau zu folgen. Die Abbildungen 45 - 47 zeigen die Laufwegediagramme der jeweiligen Tags bei diesem Parcours.

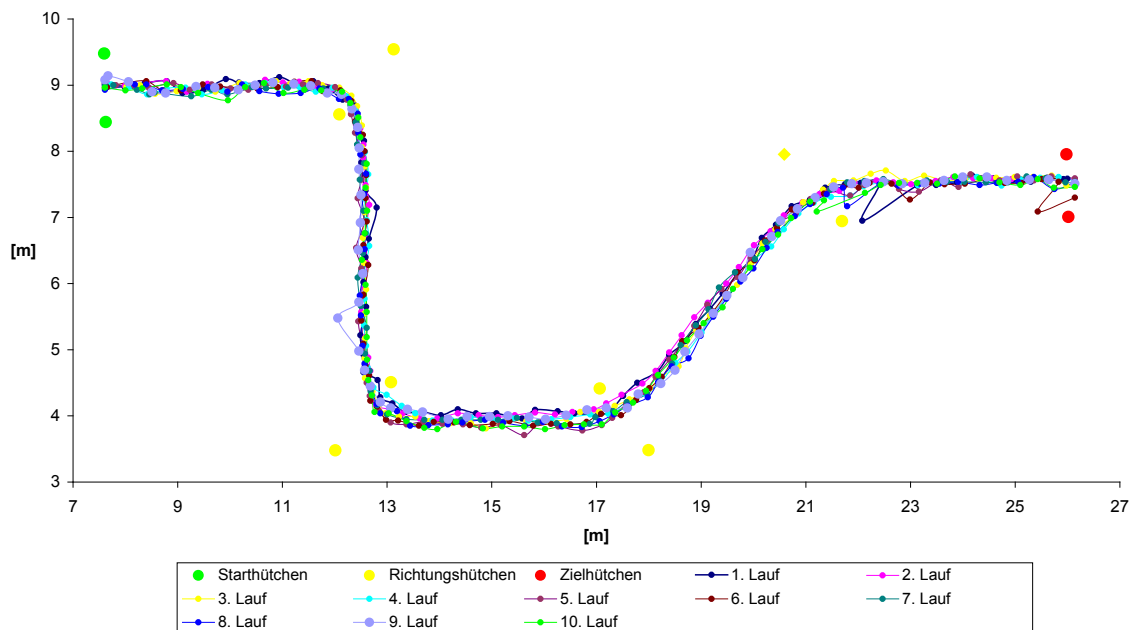


Abbildung 45: 10 Läufe, Tag 025030, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam

Im Laufwegediagramm von Tag 025030 (Abbildung 45) sind bei insgesamt fünf Läufen untypische Positionsdaten laut Datenaufzeichnung ersichtlich. Diese Läufe wurden mit dem vorhandenen Videomaterial überprüft, welches jedoch keine Abweichungen des Probanden von der Markierung zeigt. Somit wurden diese Datenpunkte als systembedingte Fehler des Ubisense-Systems abgehandelt und in die weiteren Berechnungen miteinbezogen.

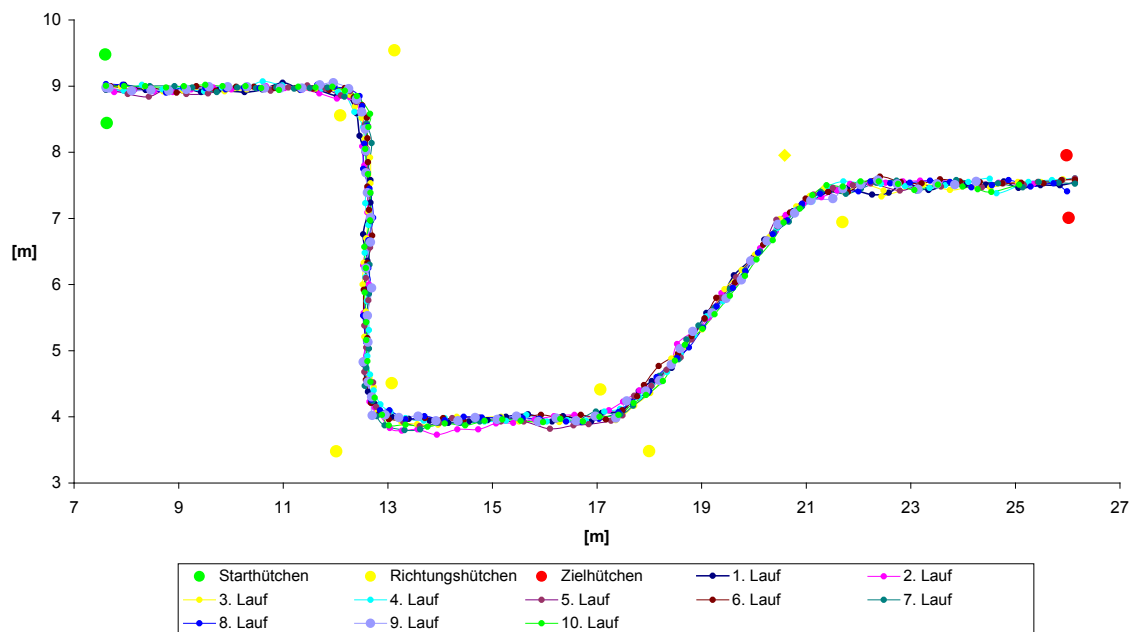


Abbildung 46: 10 Läufe, Tag 028214, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam

Im Laufwegediagramm in Abbildung 46 sind alle Positionsdaten entlang des markierten Laufweges ersichtlich und zeigen keine ungewöhnlichen Datenausreißer bzw. Streuung.

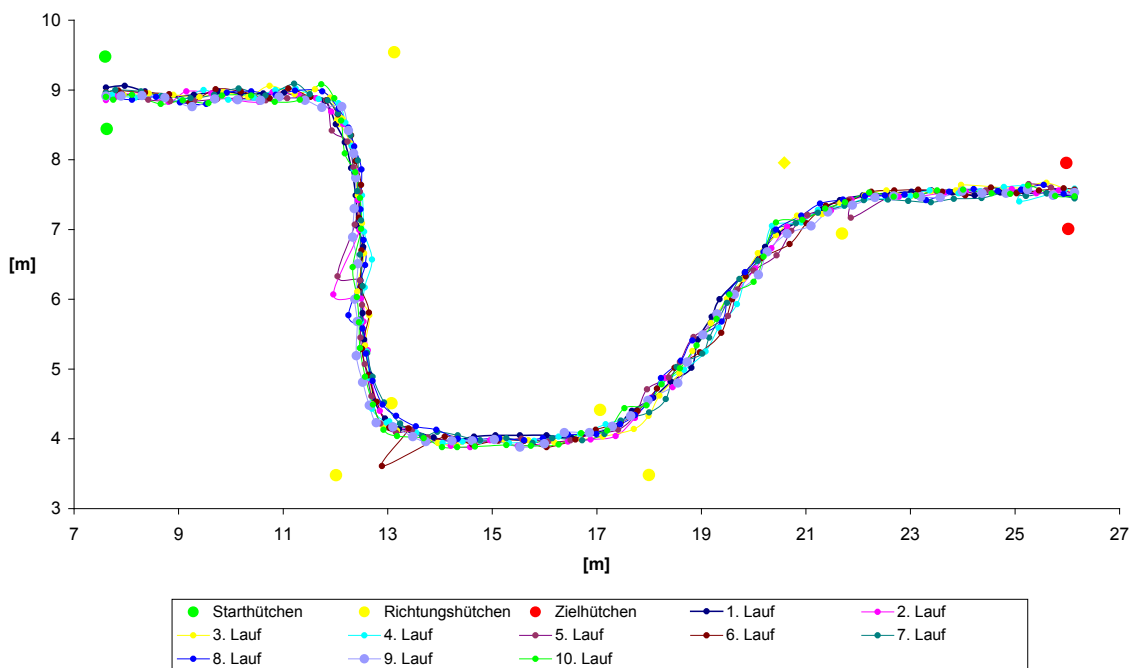


Abbildung 47: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam

Im Gegensatz dazu zeigt jedoch das Laufwegediagramm in Abbildung 47 wieder einige untypische Positionsdaten. So enthalten drei Läufe, die mit dem Tag 031238 aufgezeichnet wurden, deutliche Datenausreißer. Zusätzlich liegt fast der gesamte Laufwegeverlauf der zehn Durchgänge bereits über dem ersten Richtungshütchen. Eine Überprüfung mittels des vorliegenden Videomaterials zeigte zwar ein *Schneiden* des Probanden bei der ersten Richtungsänderung, jedoch ist nicht zu erkennen, ob der Proband dabei mit dem Kopf über dem Hütchen war. Die Auswirkungen dieser Positionsdaten werden in der Auswertung des Laufwegs in Tabelle 26 ersichtlich. Hier wird veranschaulicht, dass die größte Unterschätzung des Laufwegs sogar -142 cm bei einem Lauf beträgt.

Tabelle 26: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
langsam				
Parcours lang	2500	-49,23 $\pm$ 44,9	-142,35 bis 73,04	-1,97

Bei den Daten der Geschwindigkeit zeigt das Ubisense-System eine ähnliche Genauigkeit wie LPM bei Frencken et al. (2010). So beträgt die Abweichung im Mittel -0,15 km/h, was einer Abweichung um -2,5% entspricht. LPM lieferte hier -0,1 km/h bzw. -2,1 % Fehlerquote (Frencken et al. 2010).

Tabelle 27: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE		
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw	95% CI	r
langsam						
Parcours lang	5,99 $\pm$ 0,67	5,83 $\pm$ 0,6	-0,15 $\pm$ 0,12 (-2,5% $\pm$ 2%)	0,06	0,05 – 0,08	0,99

5.2.4.2 Geschwindigkeit mittel

Als Nächstes folgte die Datenaufzeichnung für den langer Parcours im Geschwindigkeitsbereich von 6 bis 11 km/h (*mittel*). Die Probanden absolvierten einige Probedurchgänge, um sich auf das neue Tempo einzustellen. Nach diesen Probeläufen wurden die Daten von Ubisense erneut für alle Probanden bzw. Tags aufgezeichnet. Die Abbildungen 48 - 50 zeigen die Laufwegediagramme der jeweiligen Tags bei diesem Parcours.

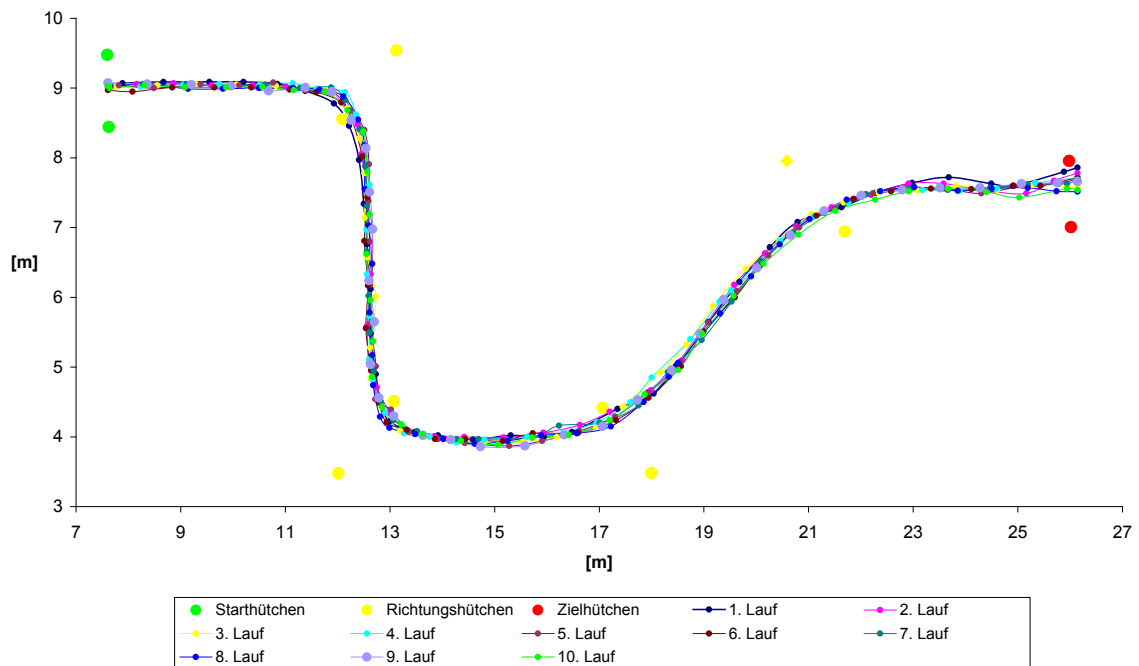


Abbildung 48: 10 Läufe, Tag 025030, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel

Das Laufwegediagramm für Tag 025030 in Abbildung 49 zeigt keine ungewöhnlichen Positionsdaten für alle zehn Läufe des Probanden. Somit wurden alle Daten für die weitere Berechnung der Laufwege herangezogen.

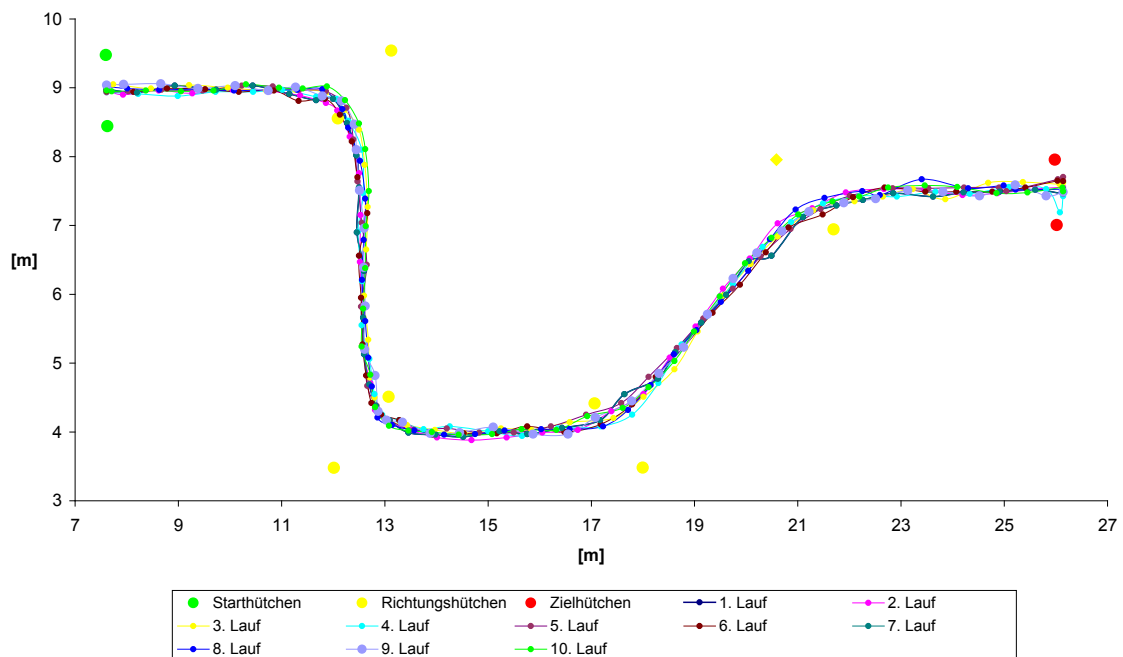


Abbildung 49: 10 Läufe, Tag 028214, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel

Das Laufwegediagramm für Tag 028214 in Abbildung 49 zeigt ebenfalls keine ungewöhnlichen Positionsdaten für alle zehn Läufe des Probanden. Lediglich beim ersten 90° Richtungswechsel liegen die Positionsdaten sehr nahe am Hütchen. Ein Vergleich mit dem Kontrollvideo brachte jedoch keine nennenswerte Abweichung des Probanden vom markierten Laufweg. Somit wurden alle Daten erneut für die weitere Berechnung der Laufwege herangezogen.

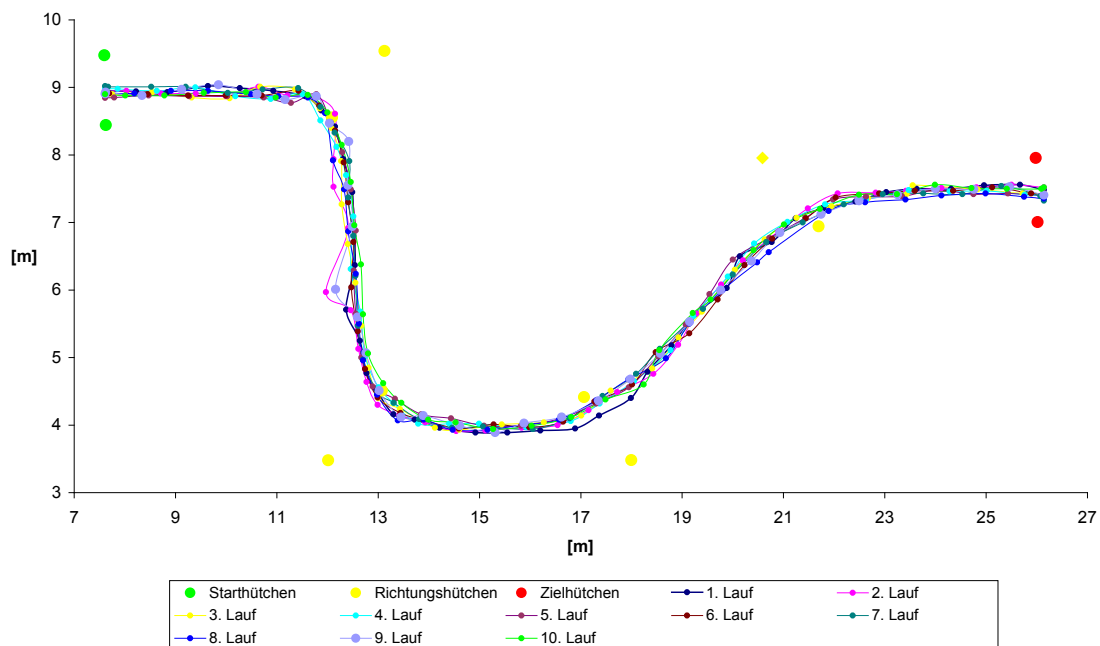


Abbildung 50: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel

Das Laufwegediagramm für Tag 031238 in Abbildung 50 zeigt bei zwei Läufen etwas ungewöhnliche Positionsdaten nach etwa 7 m der Laufstrecke. Überraschend hierbei ist, dass bei beiden Läufen die Positionsdatenabweichung an der gleichen Stelle passiert. Auf dem Video ist wie bei allen anderen Vorkommnissen dieser Art keine merkliche Abweichung des Probanden von der Idealstrecke ersichtlich. Auch sind keine ruckartigen Kopfbewegungen erkennbar. Zusätzlich zu den Datenausreißern zeigt sich, dass die Daten bei den Richtungswechseln bereits über die Richtungstore hinausreichen, dies ist auf dem Video definitiv nicht erkennbar. Somit wird dieser Fehler in den Positionsdaten der Datenaufzeichnung von Ubisense zugeschrieben und wie bisher in die weitere Auswertung einbezogen. Die Daten der Auswertung der Laufwege der Probanden sind in Tabelle 28 ersichtlich. Die Daten zeigen hier erneut eine Unterschätzung des tatsächlich zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel ca. -147 cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 25 m eine Abweichung von -5,9 %.

Tabelle 28: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min – max	
mittel				
Parcours lang	2500	-146,9 $\pm$ 28,9	-199 bis -93,3	-5,9

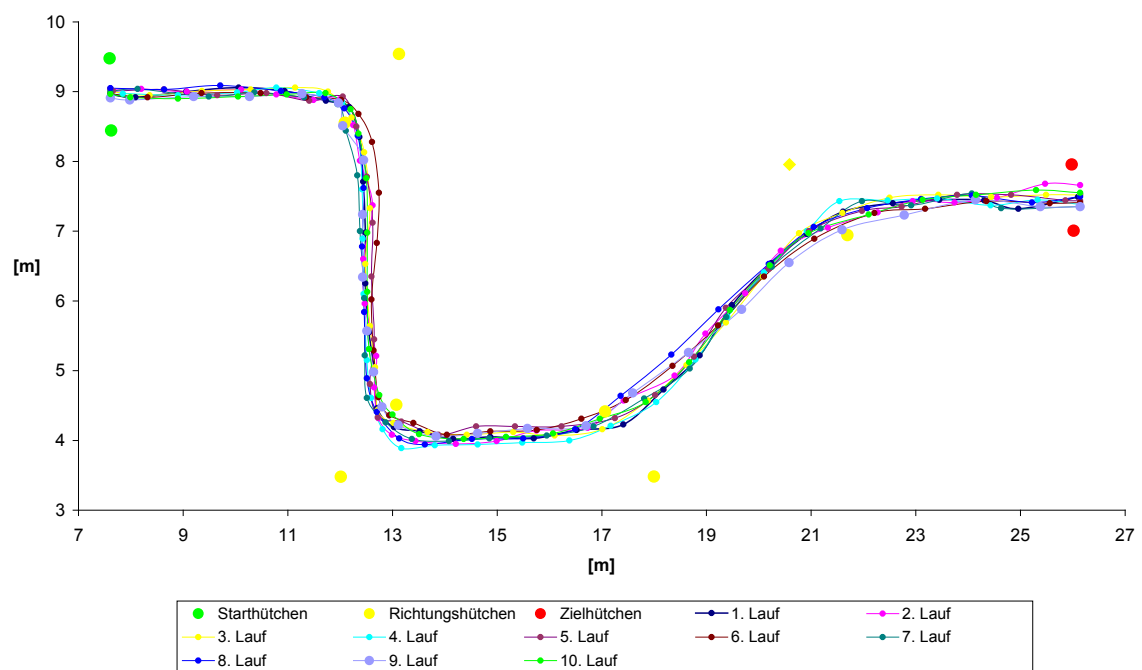
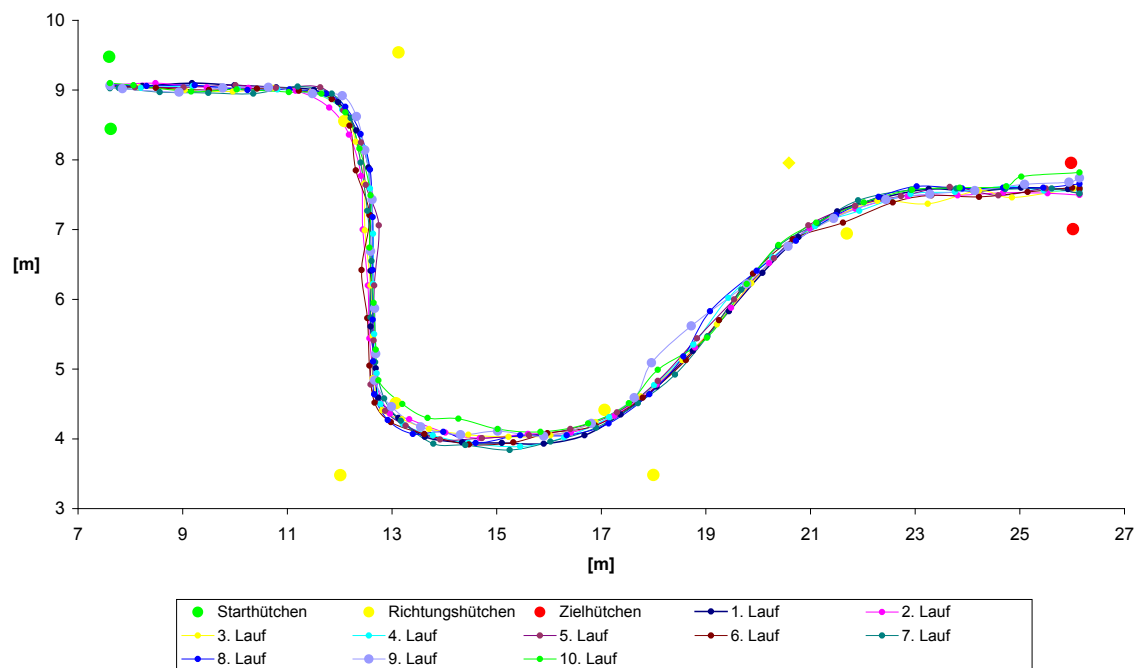
Bei den Daten der Geschwindigkeit zeigt das Ubisense-System eine deutlich niedrigere Genauigkeit als LPM. So beträgt die Abweichung im Mittel -0,7 km/h, was einer Abweichung um -6,7 % entspricht. LPM lieferte hier 0,2 km/h bzw. eine Fehlerquote von -1,3 % (Frencken et al. 2010).

Tabelle 29: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel

Auswertung Geschwindigkeit						
Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE		
	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Mittel $\pm$ Standardabweichung	Raw	95% CI	r
mittel						
Parcours lang	10,4 $\pm$ 0,7	9,7 $\pm$ 0,5	-0,7 $\pm$ 0,2 (-6,7% $\pm$ 1,5%)	0,1	0,08 – 0,14	0,98

5.2.4.3 Geschwindigkeit schnell

Als letzter Punkt der Datenaufzeichnungen folgten die Läufe für den langen Parcours im Geschwindigkeitsbereich *schnell*. Die Probanden absolvierten erneut einige Probedurchgänge, um sich auf das neue Tempo einzustellen. Wie bereits beim 90°-Richtungsänderung-Parcours wurde das Lauftempo ein wenig reduziert, um das *Schneiden* der Kurven zu minimieren. Nach diesen Probeläufen wurden die Daten aller Probanden bzw. Tags mithilfe von Ubisense erneut aufgezeichnet. Die Abbildungen 51 - 53 zeigen die Laufwegediagramme der jeweiligen Tags bei diesem Parcours.



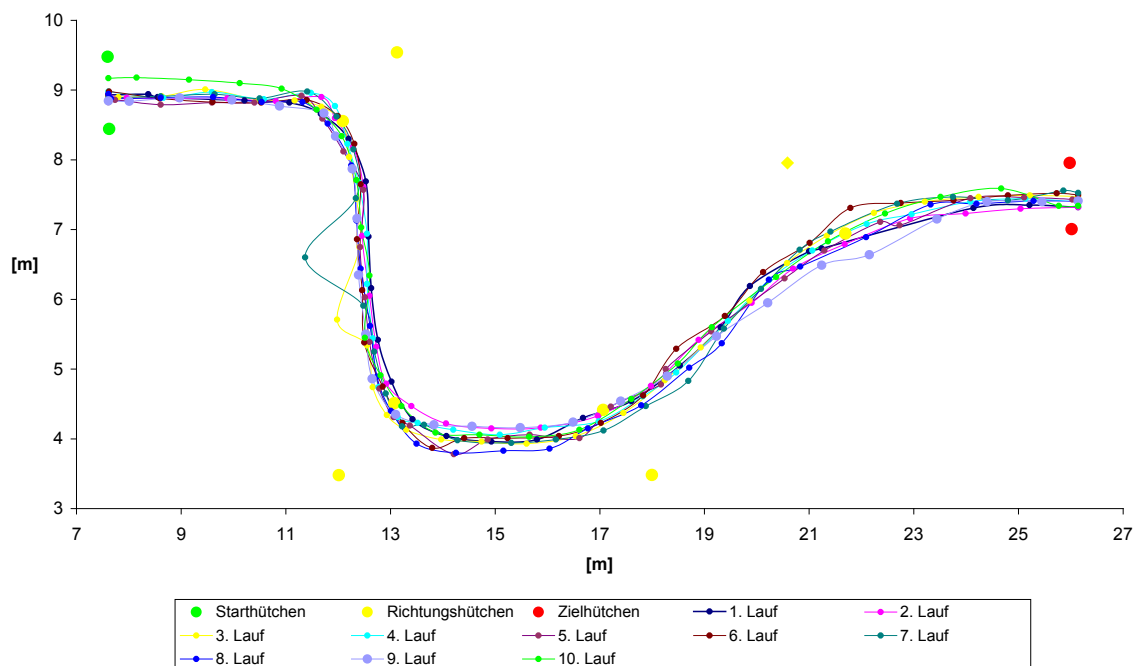


Abbildung 53: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell

Die oben in Abbildung 51 und 52 gezeigten Laufwegediagramme zeigen keine unerwarteten Datenausreißer. Bei diesen Diagrammen weicht der aufgezeichnete Laufweg jedoch bereits stark vom gewünschten und markierten Laufweg ab. Bei der Kontrolle mit dem vorhandenen Videomaterial kann jedoch eine solch starke Abweichung erneut nicht erkannt werden. Im Laufwegediagramm in Abbildung 53 ist die Differenz der Laufwege noch markanter. Zusätzlich zeigen zwei Läufe untypische Positionsdaten. Das Videomaterial zeigte auch hier keine ungewöhnlichen Bewegungen des Probanden an diesen Stellen. Somit wird diese fehlerhafte Datenaufzeichnung der Positionserfassung dem Ubisense-System zugeschrieben, da keine anderen fehlerverursachenden Einflüsse bekannt sind. Die Daten der Auswertung für die Laufwege der Probanden sind in Tabelle 30 ersichtlich. Die Daten zeigen hier erneut eine Unterschätzung des tatsächlich zurückgelegten Laufweges. Die Abweichung beträgt im Mittel ca. -168 cm, dies ergibt bei der Streckenlänge von 25 m eine Abweichung von -6,8 %.

Tabelle 30: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell

Auswertung Laufweg				
Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %
		Mittel ± Standardabweichung	min – max	
schnell				
Parcours lang	2500	-168,8 ± 38	-246,3 bis -79,4	-6,8

Bei den Daten der Geschwindigkeit (Tabelle 31) zeigt das Ubisense-System erneut eine niedrigere Genauigkeit als LPM bei Frencken et al. (2010). So beträgt die Abweichung im Mittel -1 km/h, was einer Abweichung um -7,4 % entspricht. LPM lieferte hier -0,2 km/h bzw. eine Fehlerquote von -1,3 % (Frencken et al. 2010).

Tabelle 31: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell

Parcours	Auswertung Geschwindigkeit					
	Geschwindigkeit Lichtschranke Mittel $\pm$ Standardabweichung	Geschwindigkeit Ubisense Mittel $\pm$ Standardabweichung	Abweichung Mittel $\pm$ Standardabweichung	TEE Raw	95% CI	r
schnell	13,6 $\pm$ 0,9	12,6 $\pm$ 0,8	-1 $\pm$ 0,3 (-7,4% $\pm$ 1,9%)	0,2	0,16 – 0,27	0,97
Parcours lang						

5.3 Übersicht der Auswertungen von Laufweg und Geschwindigkeit

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Auswertungen der verschiedenen Parcours und Geschwindigkeitsstufen zusammengefasst dargestellt. Dadurch wird ein besserer Überblick über die erhaltenen Daten geschaffen, um die verschiedenen Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. In Tabelle 32 ist die Auswertung der Laufwege für alle Parcours und Geschwindigkeiten abgebildet. Beim Parcours *5-m-Gerade* überschätzt Ubisense den gelaufenen Weg bei allen Geschwindigkeitsstufen, wobei mit steigender Geschwindigkeit die Höhe der Überschätzung abnimmt. Eine ähnliche Überschätzung kann auch beim LPM-System von Frencken et al. (2010) beobachtet werden. Die Laufwegdaten dazu sind in Tabelle 33 ersichtlich. Beim Parcours *45°-Richtungswechsel* zeigt sich ebenfalls eine Überschätzung des zurückgelegten Laufweges, jedoch nur mehr bei der Geschwindigkeitsstufe langsam. Bei allen weiteren Parcours und Geschwindigkeiten kommt es zu einer Unterschätzung des Laufweges. Dabei lässt sich erkennen, dass die mittlere Abweichung mit zunehmendem Tempo und stärkerer Richtungsänderung zunimmt. Dabei ist die Abweichung des Laufweges bei stärkerer Richtungsänderung deutlich größer. So hat Ubisense bei der Geschwindigkeit *mittel* eine Abweichung von -1,49 % beim *45°-Richtungswechsel*. Beim Parcours *90°-Richtungswechsel* beträgt die Abweichung hingegen schon -2,77 %. Bei der Laufgeschwindigkeit *schnell* zeigt sich ein ähnlicher Verlauf. -2,16 % Abweichung bei *45°-Richtungswechsel* stehen einer Abweichung von -5,18 % beim *90°-Richtungswechsel* gegenüber. Diese Abweichungssteigerung in Abhängigkeit der Richtungsänderung zeigt sich ebenfalls beim untersuchten System von Frencken et al. (2010), zu sehen in Tabelle 33.

In Tabelle 34 sind die Daten der Geschwindigkeitsauswertung ersichtlich. Diese zeigen, dass Ubisense die Geschwindigkeit je nach Parcours und Lauf tempo um max. 1 km/h

unterschätzt. Aus den Daten geht eindeutig hervor, dass der Fehler der Geschwindigkeitserfassung mit zunehmendem Lauftempo zunimmt. Dies spiegelt sich im Anstieg des TEE wider. Auch ist der TEE bei der Geschwindigkeit *langsam* wesentlich stabiler. Dies sieht sich in den Werten des 95 %-Konfidenzintervalls des TEE der jeweiligen Geschwindigkeitsstufen wieder. Des Weiteren zeigt sich kein Zusammenhang des TEE mit steigender Richtungsänderung. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson liegt mit Werten von 0,78 bis 1 sehr hoch und bestätigt den linearen Zusammenhang zwischen den Daten von Ubisense und den Referenzmessungen. Die Abweichungen des Ubisense Systems sind hierbei ähnlich denen vom LPM System bei Frencken et al. (2010) Die Ergebnisse von Frencken et al. (2010) sind in Tabelle 35 zu sehen.

Tabelle 32: Auswertung der Laufwege aller Parcours und Geschwindigkeiten des Ubisense-Systems

Geschwindigkeit/ Parcours	Länge [cm]	Abweichung		Abweichung in %	v in %
		Mittel $\pm$ Standardabweichung	min - max		
<i>langsam</i>					
5-m-Gerade	500	24,30 $\pm$ 17,27	7,57 bis 91,64	4,86	3,29
45-Grad-Lauf	1000	11,6 $\pm$ 5,42	1,93 bis 22,32	1,16	0,53
90-Grad-Lauf	1000	-7,3 $\pm$ 9,25	-22,52 bis 11,13	-0,73	0,93
langer Parcours	2500	-49,23 $\pm$ 44,9	-142,35 bis 73,04	-1,97	1,83
<i>mittel</i>					
5-m-Gerade	500	3,99 $\pm$ 3,55	0,23 bis 13,16	0,8	0,79
45-Grad-Lauf	1000	-14,85 $\pm$ 3,76	-22,27 bis -7,95	-1,49	0,38
90-Grad-Lauf	1000	-27,68 $\pm$ 14,17	-43,73 bis 25,94	-2,77	1,46
langer Parcours	2500	-146,9 $\pm$ 28,9	-199,7 bis -93,3	-5,9	1,23
<i>schnell</i>					
5-m-Gerade	500	1,05 $\pm$ 0,69	0,22 bis 3,73	0,2	0,14
45-Grad-Lauf	1000	-21,57 $\pm$ 4,83	-33,57 bis -12,23	-2,16	0,49
90-Grad-Lauf	1000	-51,77 $\pm$ 7,55	-70,31 bis -36,83	-5,18	0,79
langer Parcours	2500	-168,8 $\pm$ 38	-246,3 bis -79,4	-6,8	1,63

Tabelle 33: Auswertung der Laufwege aller Parcours und Geschwindigkeiten des LPM-Systems

Course	Course length (cm)	Difference			Mean difference as a %	SD as CV%
		Mean $\pm$ SD	Min-max	95% CI		
<i>Walking</i>						
Straight	500	1 $\pm$ 2	-2 to 5	0 to 2	0.2	0.4
45° turn	1000	-8 $\pm$ 6	-9 to 4	-10 to -6	-0.8	0.6
90° turn	1000	-16 $\pm$ 10	-33 to 6	-20 to -12	-1.6	1.0
Combined	2500	-29 $\pm$ 27	-77 to 26	-40 to -19	-1.2	1.1
<i>Sprinting</i>						
Straight	500	0 $\pm$ 3	-6 to 10	-1 to 1	0.0	0.6
45° turn	1000	-6 $\pm$ 9	-25 to 10	-9 to -2	-0.6	0.9
90° turn	1000	-16 $\pm$ 20	-48 to 25	-24 to -9	-1.6	2.0
Combined	2500	-2 $\pm$ 42	-63 to 104	-14 to 18	-0.1	1.7

Quelle: Frencken et al., 2010. Soccer-specific accuracy and validity of the local position measurement (LPM) system. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2010. Seite 643

Tabelle 34: Auswertung der Geschwindigkeit aller Parcours und Laufgeschwindigkeiten des Ubisense-Systems

Auswertung Geschwindigkeit [km/h]								
Geschwindigkeit/ Parcours	Geschwindigkeit Lichtschranke	Geschwindigkeit Ubisense	Abweichung	TEE		TEE %		r
	Mittel ± Standardabweichung	Mittel ± Standardabweichung		Raw	95 % CI	CV %	95 % CI	
<i>langsam</i>								
5-m-Gerade	4,93 ± 0,2	5,02 ± 0,18	0,09 ± 0,09 (1,89% ± 1,85%)	0,17	0,13 - 0,22	3,3	2,6 - 4,5	0,78
45-Grad-Lauf	5,34 ± 0,75	5,38 ± 0,75	0,035 ± 0,03 (0,66% ± 0,63%)	0,03	0,03 - 0,05	0,6	0,5 - 0,8	1
90-Grad-Lauf	4,75 ± 0,14	4,7 ± 0,14	-0,05 ± 0,05 (-1,06% ± 1,14%)	0,06	0,04 - 0,07	1,2	0,9 - 1,6	0,93
langer Parcours	5,99 ± 0,67	5,83 ± 0,6	-0,15 ± 0,12 (-2,5% ± 2%)	0,06	0,05 - 0,08	1	0,8 - 1,4	0,99
<i>mittel</i>								
5-m-Gerade	10,84 ± 0,93	10,71 ± 0,84	0,13 ± 0,35 (-1,18% ± 3,2%)	0,32	0,25 - 0,43	3	2,4 - 4,1	0,93
45-Grad-Lauf	12,21 ± 0,79	11,73 ± 0,83	-0,47 ± 0,18 (-3,88% ± 1,45%)	0,18	0,14 - 0,24	1,5	1,2 - 2,1	0,98
90-Grad-Lauf	9,2 ± 0,5	8,8 ± 0,46	-0,37 ± 0,23 (-4,1% ± 2,5%)	0,21	0,16 - 0,28	2,4	1,9 - 3,2	0,89
langer Parcours	10,4 ± 0,7	9,7 ± 0,5	-0,7 ± 0,2 (-6,7% ± 1,5%)	0,1	0,08 - 0,14	1	0,8 - 1,4	0,98
<i>schnell</i>								
5-m-Gerade	16,07 ± 1,08	15,45 ± 0,95	0,62 ± 0,68 (-3,86% ± 4,2%)	0,61	0,48 - 0,82	4,2	3,3 - 5,7	0,78
45-Grad-Lauf	16,82 ± 0,73	16,26 ± 0,75	-0,56 ± 0,32 (-3,32% ± 1,9%)	0,32	0,25 - 0,43	2	1,6 - 2,7	0,91
90-Grad-Lauf	12,39 ± 0,47	11,49 ± 0,4	-0,91 ± 0,19 (-7,36% ± 1,57%)	0,17	0,13 - 0,23	1,5	1,2 - 2,0	0,91
langer Parcours	13,6 ± 0,9	12,6 ± 0,8	-1 ± 0,3 (-7,4% ± 1,9%)	0,2	0,16 - 0,27	1,6	1,2 - 2,1	0,97

Tabelle 35: Auswertung der Geschwindigkeit aller Parcours und Laufgeschwindigkeiten des LPM-Systems

Course	Actual	LPM	Difference		TEE		TEE%		<i>r</i>
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	95% CI	Raw	95% CI	CV%	95% CI	
<i>Walking</i>									
Straight	5.5 ± 0.3	5.3 ± 0.3	−0.2 ± 0.2 (−2.9 ± 3.6%)	−0.2 to −0.1	0.2	0.2–0.3	3.9	3.0–5.2	0.80
45° turn	5.7 ± 0.1	5.6 ± 0.2	−0.1 ± 0.2 (1.8 ± 2.6%)	−0.2 to −0.0	0.1	0.1–0.1	1.6	1.3–2.2	0.71
90° turn	5.5 ± 0.2	5.4 ± 0.3	−0.1 ± 0.1 (2.5 ± 2.0%)	−0.2 to −0.1	0.1	0.1–0.1	1.4	1.1–1.9	0.92
Combined	5.3 ± 0.3	5.1 ± 0.3	−0.1 ± 0.1 (2.1 ± 1.3%)	−0.1 to −0.1	0.1	0.1–0.1	1.4	1.1–1.8	0.97
<i>Sprinting</i>									
Straight	16.6 ± 1.2	16.0 ± 1.2	−0.6 ± 0.5 (−3.9 ± 3.1%)	−0.8 to −0.5	0.5	0.4–0.7	3.2	2.5–4.3	0.91
45° turn	17.4 ± 0.9	16.9 ± 0.8	−0.5 ± 0.4 (−3.1 ± 2.1%)	−0.7 to −0.4	0.4	0.3–0.5	2.2	1.7–2.9	0.90
90° turn	14.9 ± 0.7	14.6 ± 0.8	−0.4 ± 0.4 (−2.3 ± 2.7%)	−0.5 to −0.2	0.4	0.3–0.5	2.6	2.0–3.5	0.86
Combined	15.3 ± 0.7	15.1 ± 0.5	−0.2 ± 0.3 (−1.3 ± 2.1%)	−0.3 to −0.1	0.3	0.2–0.4	1.8	1.5–2.5	0.93

Quelle: Frencken et al., 2010. Soccer-specific accuracy and validity of the local position measurement (LPM) system.

Journal of Science and Medicine in Sport 2010. Seite 643

6 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, die Genauigkeit und Validität des radiowellenbasierten Positionserfassungssystems Ubisense zu bestimmen. Diese Untersuchung erfolgte in Anlehnung an die Studie von Frencken et al. (2010). Die gewählten Messaufbauten sollen die Genauigkeit und Validität des Systems bei fußballcharakteristischen Bewegungsabläufen untersuchen.

Zu Beginn der Messungen wurden die Daten bei statischen Bedingungen aufgenommen. Hierbei wurden die Tags auf Stativen aufgestellt und deren Position aufgenommen. Hierbei wurde eine maximale Abweichung von 3 cm festgestellt, was eine sehr hohe Genauigkeit des Systems unter diesen Bedingungen belegt. Leser, Baca und Ogris (2011) schreiben dem Ubisense System eine Genauigkeit von 20cm und dem LPM System von 10cm bei statischen Bedingungen zu. Es folgten Messungen zur Erfassung der Daten bei dynamischen Bedingungen. Dazu wurde die von Ubisense aufgezeichnete Distanz bei den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen mit der tatsächlichen Länge der verschiedenen Parcours verglichen. Die Ergebnisse in Tabelle 32 zeigen ähnliche Abweichungen wie bei bereits durchgeführten Studien von GPS basierten Systemen (5,8 % im Mittel) und videobasierten Systemen (4,8 % im Mittel) bei Edgecomb und Norton (2006) sowie Coutts und Duffield (2010). So beträgt der größte Fehler von Ubisense 6,8 %. Dieser Fehler tritt beim längsten und komplexesten Parcours bei der schnellsten Geschwindigkeitsstufe auf. Beim simplen Parcours *5-m-Gerade* kommt es bei allen Geschwindigkeiten zu einer Überschätzung des tatsächlichen Laufweges. Es zeigt sich jedoch, dass mit steigender Laufgeschwindigkeit diese stetig abnimmt. Schließlich erreicht das System bei diesem Parcours die kleinste Abweichung von 0,2 % bei der Stufe *schnell*. Hingegen kommt es bei allen anderen Parcours zu einer steigenden Unterschätzung des Laufweges mit steigendem Tempo. Die größte Abweichung erhalten wir beim langen Parcours gefolgt vom Parcours *90°-Richtungswechsel*, jeweils beim Tempo schnell. Es ist für die Probanden beim *90°-Richtungswechsel* am schwierigsten, dem markierten Laufweg möglichst genau zu folgen. Somit kommt es mit steigender Laufgeschwindigkeit zu einem *Schneiden* der Kurve bzw. zumindest zu einer verstärkten Schwerpunktverlagerung. Dies führt dazu, dass der zurückgelegte Laufweg der Probanden kleiner wird als der tatsächliche Laufweg des Parcours. Dies ist bereits bei den Laufwegdiagrammen gut ersichtlich und erklärt teilweise die systematische Unterschätzung des Laufweges durch Ubisense.

Somit zeigt diese Arbeit, dass Ubisense ein gültiges Instrument zur Aufzeichnung von Laufwegen ist. Dies wird durch annähernd gleiche Werte bei der Abweichung im Vergleich zu anderen Untersuchungen von Positionserfassungssystemen bestätigt. Im Vergleich zur Studie von Frencken et al. (2010), welche das gleiche Parcoursdesign verwendet, zeigt Ubisense etwas größere Abweichungen bei der Aufzeichnung des Laufweges. Jedoch

wurden die Daten des Ubisense-Systems ohne jegliche Filterung aufgezeichnet und für weitere Berechnungen verwendet. Die Verwendung von gängigen Rohdatenfiltern führt in Zukunft wahrscheinlich auch zu einer verbesserten Genauigkeit des Systems.

Weiterer Teil dieser Arbeit war der Vergleich der berechneten durchschnittlichen Geschwindigkeit von Ubisense mit der berechneten Geschwindigkeit auf Basis des Lichtschrankensystems. Hierbei wurden die Daten erneut mittels deskriptiver Statistik beschrieben. Neben der absoluten sowie relativen (%) Abweichung der erhobenen Messgrößen wurden die Daten mittels linearer Regression, nach Vorlage der Kalkulationstabelle von Hopkins (2009), validiert. Dabei wurden die berechneten Datensätze Anhand der Daten von Ubisense und dem Lichtschrankensystem in die Vorlage eingegeben. Die Kalkulationstabelle berechnet die Maße, TEE (typical error of estimate) sowie die Korrelation nach Pearson. Die Ergebnisse in Tabelle 34 zeigen eine durchwegs hohe Korrelation der beiden Datensätze ($0,74 < r < 1$). Dabei lässt sich erkennen, dass das Positionserfassungssystem die Geschwindigkeit, ausgenommen den *Parcours 5-m-Gerade*, systematisch unterschätzt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Parcourslänge die Abweichung der aufgezeichneten Geschwindigkeit zunimmt. Das gleiche Bild zeigt sich bei den gelaufenen Geschwindigkeitsstufen. So nimmt die Abweichung mit steigender Laufgeschwindigkeit systematisch zu.

Weiters wurde der TEE (typical error of estimate) berechnet. TEE ist gleichzusetzen mit dem SEE (standard error of estimate) und wurde bei Hopkins (2009) lediglich anders bezeichnet. Diese Größe ist ein Maß für die Genauigkeit von Vorhersagen mittels linearer Regression und wird Standardfehler genannt. Betrachten wir nun den TEE in Tabelle 34, so zeigt sich, dass die Größe des Fehlers mit steigender Geschwindigkeit zunimmt. Dieser Trend konnte bereits bei der Untersuchung von Frencken et al. (2010) festgestellt werden und bestätigt dem Ubisense-System eine ähnliche Genauigkeit. Zusätzlich zeigt sich auch, dass der TEE nicht mit steigender Parcourslänge und somit steigender Anzahl an Richtungsänderungen zunimmt.

In Anbetracht der erhobenen Daten kann dem Ubisense System eine ausreichend hohe Genauigkeit für die Positionserfassung unter fußballspezifischen Bedingungen zugeschrieben werden. Diese Untersuchung zeigt, dass Ubisense durchaus ein geeignetes Mittel für die Erfassung von Laufwegen und Durchschnittsgeschwindigkeiten ist. Dabei muss erwähnt werden, dass dieses Studiendesign Schwächen aufweist. Allein durch die Körperschwerpunktverlagerung der Probanden ohne eine tatsächliche Positionsänderung kann es bereits zu einer Abweichung der erfassten Positionsdaten von der Ideallinie kommen. Bezogen auf die starken Richtungsänderungen von 90 Grad auf engstem Raum und die dabei gelaufenen Geschwindigkeiten sind hier bereits große Positionsabweichungen der Tags vom idealen Laufweg zu erwarten. Zudem schreiben Leser et al. (2014), dass die

Validierung mittels definierten Laufwegen (Parcours) und Lichtschranken als Referenzsystem zwei weitere Probleme mit sich bringen. So haben die definierten Laufwege zwar meist ein sportartenspezifisches Design, können jedoch Bewegungsabläufe bei Spielbedienungen nicht realistisch wiedergeben da Einflüsse wie die aktuelle Spielsituation oder Spielsequenz nicht beachtet werden. Auch wenn die Parcours an verschiedenen Positionen des Beobachtungsfeldes des Positionserfassungssystems durchgeführt werden können, ist laut Leser et al. (2014), die Aufzeichnung von freien Bewegungen über das gesamte Beobachtungsfeld wesentlich aussagekräftiger. Als weiterer Nachteil dieses Studiendesigns ist die Positionserfassung in bestimmten Zeitabständen (Leser et al. 2014). Durch die vorgegebene Aufnahmefrequenz der Positionserfassungssysteme werden die Positionsdaten in festen Zeitabständen aufgezeichnet. Somit kann es bei der Positionserfassung im Bereich der Start und Zieltore von Laufparcours zu Abweichungen kommen, da die Messdaten eventuell vor oder nach dem Tor aufgezeichnet werden. Zumindest diesem Problem wurde in dieser Arbeit entgegengewirkt. Da man beim durchlaufen des Start oder Zieltors von einer gleichmäßigen Bewegung ausgehen kann, wurden die genauen Positionsdaten inkl. Zeitpunkt für das Start und Zieltor in einer Excel Tabelle mittels linearer Interpolation berechnet. So wurde sichergestellt, dass es für den Zeitpunkt des Durchlaufens der Lichtschranke (Referenzsystem) genaue Positionsdaten mit Zeitangabe vorliegen.

In der aktuell vorliegenden Literatur ist kein goldener Standard für die Erfassung von Laufwegen bei gelaufenen Richtungsänderungen definiert. Hierbei muss auch unterschieden werden, ob die Positionserfassungssysteme auf die Genauigkeit von Parametern wie Distanzen und Geschwindigkeit untersucht werden, oder ob die erfassten einzelnen Positionsdaten mit einem Referenzsystem verglichen werden. Gerade Faktoren wie die Körperschwerpunktverlagerung und das *Schneiden* bei den Richtungsänderungen sind noch große Problemfaktoren für die Validierung von Positionserfassungssystemen. Zuletzt muss noch erwähnt werden, dass die in dieser Studie behandelten Ergebnisse anhand von aufgezeichneten Positionsdaten aus dem Jahr 2011 erstellt wurden. Zu dieser Zeit wurde Ubisense noch mit der Standardkonfiguration betrieben. Im Laufe weiterer Testläufe und Aufzeichnungen wurde das Setup von Ubisense weiter verbessert und optimiert. Jedoch konnte Ubisense bereits mit den Ergebnissen in dieser Studie zeigen, dass es genaue Positionsdaten bei statischen und dynamischen Bedingungen liefert.

7 Literaturverzeichnis

Barris, S. & Button, C. (2008). Review of Vision-Based Motion Analysis in Sport. *Sports Medicine*, 38 (12), 1025–1043.

Bishop, D., Spencer, M., Duffield, R. & Lawrence, S. (2001). The validity of a repeated sprint ability test. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 4, 19–29.

Bloomfield, J., Polman, R. & O'Donoghue, P. (2007). Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6, 63-70.

Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L. & Reilly, T. (2008). The Role of Motion Analysis in Elite Soccer. *Contemporary Performance Measurement Techniques and Work Rate Data* [Elektronische Version]. *Sports Med*, 38 (10), 839–862.

Coutts, A. & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13, 133–135.

Di Salvo, V., Collings, A., McNeilly, B. & Cardinale, M. (2006). Validation of ProZone®: A new videobased performance analysis system. [Elektronische Version]. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6 (1), 108–119.

Dogramaci, S. N., Watsford, M. L. & Murphy, A.J. (2011). The reliability and validity of subjective notational analysis in comparison to global positioning system tracking to assess athlete movement patterns. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 852–859.

Edgecomb, S. J. & Norton, K. I. (2006). Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian Football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9, 25–32.

Eisenacher, M. (2004). Optimierung von Ultra-Wideband-Signalen (UWB). *Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Universität Karlsruhe*. Band 16. Karlsruhe: E & B Printware.

Frencken, W.G.P., Lemmink, A.P.M. & Delleman, N.J. (2010). Soccer-specific accuracy and validity of the local position measurement (LPM) system. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13, 641 – 645.

Hof, A. L., Gazendam, M. G. J. & Sinke, W. E. (2005). The condition for dynamic stability. *Journal of biomechanics*, 38 (1), 1–8.

Hopkins, W.G. A. (2009) new view of statistics. Sportsci.org: Internet society for sport science. Zugriff am 21.2.2012 unter: <http://www.sportsci.org/resource/stats/valid.html>

James, N. (2006). The Role of national analysis in soccer coaching. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 1 (2), 185–198.

Kolodziej, K.W. & Hjelm, J. (2006). *Local Positioning Systems – LBS Applications and Services*. Broken Sound Parkway: Taylor & Francis Group.

Leser, R., Baca, A. & Ogris, G. (2011). Local Positioning Systems in (Game) Sports. *Sensors*, 11, 9778–9797.

Leser, R., Schleindlhuber, A., Lyons, K. & Baca, A. (2014). Accuracy of an UWB-based position tracking system used for time-motion analyses in game sports. *European Journal of Sport Science*, 14:7, 635–642. [doi: 10.1080/17461391.2014.884167](https://doi.org/10.1080/17461391.2014.884167)

Macleod, H., Morris, J., Nevill, A., & Sunderland, C. (2009). The validity of a non-differential global positioning system for assessing player movement patterns in field hockey. *Journal of Sports Sciences*, 27, 121–128.

Ogris, G., Leser, R., Horsak, B., Kornfeind, P., Heller, M. & Baca, A. (2012). Accuracy of the LPM tracking system considering dynamic position changes. *Journal of Sports Sciences*, 30:14, 1503–1511. [doi: 10.1080/02640414.2012.712712](https://doi.org/10.1080/02640414.2012.712712)

Portas, M., Rush, C., Barnes, C. & Batterham, A. (2007). Method comparison of linear distance and velocity measurements with global positioning satellite (GPS) and the timing gate techniques. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6 (suppl.10), 7–8.

Portas, M., Harley, J. A., Barnes, C. A. & Rush, C. J. (2010), The Validity and Reliability of 1-Hz and 5-Hz Global Positioning Systems for linear, multidirectional, and soccer-specific activities. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5, 448–458.

Randers, M. B., Mujika, I., Hewitt, A., Santisteban, J., Bischoff, R., Solano, R., Zubillaga, A., Peltola, E., Krstrup, P. & Mohr, M. (2010). Application of four different football match analysis systems: A comparative study. *Journal of Sports Sciences*, 28:2, 171–182.

Reilly, T. & Thomas, V. (1976) A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play. *Journal of Human Movement Studies* 2, 87-89.

Rhodes, J., Mason, B., Perrat, B., Smith, M. & Goosey-Tolfrey, V. (2014) The validity and reliability of a novel indoor player tracking system for use within wheelchair court sports, *Journal of Sports Sciences*, 32:17, 1639-1647. [doi: 10.1080/02640414.2014.910608](https://doi.org/10.1080/02640414.2014.910608)

Shiokawa, M., Takahashi, K., Kan, A. et al. Computer analysis of soccer game by the DLT method focusing on the movement of the players and the ball [abstract no.267]. V World Congress of Science and Football. 2003 Apr 11–15. Lissabon.

Siegle, M., Stevens, T. & Lames, M. (2013). Design of an accuracy study for position detection in football, *Journal of Sports Sciences*, 31:2, 166–172.
[doi: 10.1080/02640414.2012.723131](https://doi.org/10.1080/02640414.2012.723131)

Varley, M. C., Fairweather, I. H. & Aughey, R. J. (2012). Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion, *Journal of Sports Sciences*, 30:2, 121-127. [doi: 10.1080/02640414.2011.627941](https://doi.org/10.1080/02640414.2011.627941)

Vickery, W. M., Dascombe, B. J., Baker, J. D., Higham, D. G., Spratford, W. A. & Duffield, R. (2014). Accuracy and Reliability of GPS Devices for Measurement of Sports-Specific Movement Patterns Related to Cricket, Tennis, and Field-Based Team Sports. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28 (6), 1697–1705.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: GPS-Empfänger von GPSports Systems	10
Abbildung 2: Kameraeinheit von TRACAB sowie „stereo vision“-Technology	13
Abbildung 3: Funktionsprinzip motioTrac	14
Abbildung 4: Das UWB-Prinzip	17
Abbildung 5: Überlagerung von reflektierten Signalen	18
Abbildung 6: UBW-Impuls	18
Abbildung 7: Ubisense Series 7000 Sensor	20
Abbildung 8: Schema der Positionsbestimmung eines Tags	20
Abbildung 9: UWB Compact Tag	21
Abbildung 10: Kalibrierung des Ubisense-Systems	23
Abbildung 11: 10-m-45°-Richtungswechsel	25
Abbildung 12: Positionsdaten der Tore in Microsoft Excel eingefügt	29
Abbildung 13: Positionsdaten eines Laufes des Parcours 10-m-90°-Richtungswechsel	29
Abbildung 14: 5-m-Gerade	36
Abbildung 15: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam	36
Abbildung 16: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam	37
Abbildung 17: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit langsam	37
Abbildung 18: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel	39
Abbildung 19: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel	40
Abbildung 20: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit mittel	40
Abbildung 21: 10 Läufe, Tag 031238, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell	42
Abbildung 22: 10 Läufe, Tag 025030, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell	42
Abbildung 23: 10 Läufe, Tag 028214, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell	43
Abbildung 24: 45°-Richtungswechsel	44
Abbildung 25: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	45
Abbildung 26: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	46
Abbildung 27: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	46
Abbildung 28: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	48
Abbildung 29: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	48
Abbildung 30: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	49
Abbildung 31: 10 Läufe, Tag 025030, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	51
Abbildung 32: 10 Läufe, Tag 028214, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	51
Abbildung 33: 10 Läufe, Tag 031238, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	52
Abbildung 34: 90°-Richtungswechsel	53
Abbildung 35: 10 Läufe, Tag 025030, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	54
Abbildung 36: 10 Läufe, Tag 028214, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	55

Abbildung 37: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	55
Abbildung 38: 10 Läufe, Tag 025030, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	57
Abbildung 39: 10 Läufe, Tag 028214, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	57
Abbildung 40: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	58
Abbildung 41: 10 Läufe, Tag 025030, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	60
Abbildung 42: 10 Läufe, Tag 028214, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	60
Abbildung 43: 10 Läufe, Tag 031238, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	61
Abbildung 44: Langer Parcours mit 45°- und 90°-Richtungswechseln, Länge 25 m	62
Abbildung 45: 10 Läufe, Tag 025030, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam	63
Abbildung 46: 10 Läufe, Tag 028214, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam	64
Abbildung 47: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam	64
Abbildung 48: 10 Läufe, Tag 025030, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel	66
Abbildung 49: 10 Läufe, Tag 028214, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel	66
Abbildung 50: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel	67
Abbildung 51: 10 Läufe, Tag 025030, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell	69
Abbildung 52: 10 Läufe, Tag 028214, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell	69
Abbildung 53: 10 Läufe, Tag 031238, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell	70

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick zu GPS-Systemen der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)	11
Tabelle 2: Überblick zu Videobasierten Systemen der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)	13
Tabelle 3: Überblick zu Radiowellenbasierten Systeme der bekannten Anbieter (Stand 01.08.2015)	15
Tabelle 4: Ubisense-Positionsdaten für 5-m-Gerade-Lauf	27
Tabelle 5: Ausschnitt der zusammengefassten Daten einer Messreihe, 5m-Gerade, Geschw. mittel	30
Tabelle 6: Eingabebereich der Daten in die Kalkulationstabelle, 5m-Gerade, Geschw. mittel	33
Tabelle 7: Ausgabemaske der Kalkulationstabelle, 5m-Gerade, Geschw. mittel	34
Tabelle 8: Auswertung Laufweg: Geschwindigkeit langsam, 5-m-Gerade	38
Tabelle 9: Auswertung Geschwindigkeit: Geschwindigkeit langsam, 5-m-Gerade	38
Tabelle 10: Auswertung Laufweg: Geschwindigkeit mittel, 5-m-Gerade	41
Tabelle 11: Auswertung Geschwindigkeit: Geschwindigkeit mittel, 5-m-Gerade	41
Tabelle 12: Auswertung Laufweg, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell	43
Tabelle 13: Auswertung Geschwindigkeit, 5-m-Gerade, Geschwindigkeit schnell	44
Tabelle 14: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	47
Tabelle 15: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	47
Tabelle 16: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	50
Tabelle 17: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	50
Tabelle 18: Auswertung Laufweg, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	52
Tabelle 19: Auswertung Geschwindigkeit, 45°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	53
Tabelle 20: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	56
Tabelle 21: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit langsam	56
Tabelle 22: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	59
Tabelle 23: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit mittel	59
Tabelle 24: Auswertung Laufweg, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	61
Tabelle 25: Auswertung Geschwindigkeit, 90°-Richtungswechsel, Geschwindigkeit schnell	62
Tabelle 26: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam	65
Tabelle 27: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit langsam	65
Tabelle 28: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel	68
Tabelle 29: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit mittel	68
Tabelle 30: Auswertung Laufweg, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell	70
	83

Tabelle 31: Auswertung Geschwindigkeit, langer Parcours, Geschwindigkeit schnell	71
Tabelle 32: Auswertung der Laufwege aller Parcours und Geschwindigkeiten des Ubisense- Systems	72
Tabelle 33: Auswertung der Laufwege aller Parcours und Geschwindigkeiten des LPM- Systems	72
Tabelle 34: Auswertung der Geschwindigkeit aller Parcours und Laufgeschwindigkeiten des Ubisense-Systems	73
Tabelle 35: Auswertung der Geschwindigkeit aller Parcours und Laufgeschwindigkeiten des LPM-Systems	74

Anhang: Lebenslauf

Nachname / Vorname: Jaworski Daniel
E-Mail: daniel.j@gmx.at
Nationalität: Österreich
Geburtsdatum: 28.06.1982

Berufserfahrung

- Seit 2009: Selbstständig mit der Firma Seilkaiser OG.
(<http://www.seilkaiser.at/>)
- 2007–2008: Online-Anzeigenleitung bei „Motorradreporter“
Online-Anzeigenleitung und redaktionelle Tätigkeiten beim österreichischen Internet-Motorradmagazin.
(www.motorradreporter.at)
- 2004–2009: Freelancer bei „Industrial Alpinists Vienna“
Organisation und Durchführung von Kletterveranstaltungen und -trainings, sowie auch Höhenarbeiten wie Instandhaltungsarbeiten an Windrädern, Fassadenreinigung von diversen Objekten (Millenniumtower).
(www.iav.at)
- 2004–2006: Freelancer bei „Spider Rock“
Aufbau und Betreuung von mobilen Kletterwänden sowie Aufbau der größten mobilen Flying-Fox-Anlage weltweit.
(www.spider-rock.at)
- 02/2007; 02/2008; 02/2009; 02/2010; Saison 2011/12 & 2012/13: Skilehrer
Skischule „Easy Ski“ in Saalbach, Salzburg.
- 02/2006: Skilehrer Skischule „Qualitätsskischule Brunner“
Skilehrer in Bad Kleinkirchheim, Kärnten.

Ausbildung

- Seit 03/2008: Magisterstudium Sportwissenschaft,
Universität Wien, Österreich
- Ab 03/2007: Bakkalaureatsstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, Boku
Wien, Österreich.

Besuch einzelner Lehrveranstaltungen für ein besseres Verständnis der Fachbereiche Mathematik, Vermessung, Technisches Zeichnen, Mechanik und Hydraulik.

- 12/2007: USI-Begleitskilehrerausbildung, Universität Wien, Österreich.
- 03/2003–03/2008: Bakkalaureatsstudium Leistungssport, Universität Wien, Österreich.
- 03/2002–03/2003: Hoch- und Tiefbaustudium, TU Wien, Österreich.
- 1996–2000: HTL für Elektrotechnik, Wien 1, Österreich.

Sprachkenntnisse

- Deutsch: Sehr gut in Wort und Schrift
- Englisch: Sehr gut in Wort und Schrift
- Polnisch: Muttersprache

Zusatzqualifikationen

- EDV-Kenntnisse: Gute Kenntnisse in Microsoft Office, Grundlagen in HTML, Adobe Photoshop, SPSS, Dartfish, Simi Motion, Auto CAD 14
- Grundkenntnisse im Umgang mit High-Speed-Kameras, Kraftmessplatte der Abteilung für Biomechanik am ZSU Wien, diversen Messsystemen (X-Sens)
- Persönliches Interesse an der Sportgerätetechnik sowie der Biomechanik. Bakk.-Arbeit über Seiltechnologie im Sportklettern, Mitarbeit am Feder-Dämpfer-Projekt der Abteilung für Biomechanik/Bewegungswissenschaft und Sportinformatik des ZSU Wien.
- Staatlich geprüfter Skilehrer
- Sehr gutes Verständnis für allgemeine Grundlagen der Mechanik
- Zertifizierter Höhenarbeiter (IRATA)
- Zertifizierter Gerüstbauer (Gerüste der Firma Leyher bis 36 m Höhe)

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z. B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.

Unterschrift, Datum: _____