

Zentimetergenaue Messung im Sport – Möglichkeiten und Grenzen von GPS

1 Einleitung

Dreidimensionale Bewegungsanalysesysteme in Messlabors haben heute in der Sportwissenschaft einen festen Platz eingenommen. Für Feldsportarten ergibt sich jedoch eine besondere Situation, denn Bewegung im eigentlichen Sinne findet drinnen nicht statt. Andererseits ist es mit großem technischen und personellen Aufwand verbunden, die zumeist videobasierten Systeme im Freien zu installieren. Hinzu kommt, dass meist nur ein kleiner räumlich begrenzter Ausschnitt der Bewegung studiert werden kann.

Dieser Beitrag präsentiert ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsergebnisse eines GPS-basierten Messsystems für die Bestimmung der Trajektorie von Skispringern¹. Der technische Fortschritt im Bereich der Elektronik hat zu immer leistungsfähigeren GPS-Empfängern geführt. Ebenso wurden die Auswertelgorithmen verbessert. Dies in Verbindung mit der Miniaturisierung der Hardware ermöglichte es, einen speziellen Messhelm zu entwickeln. Mit dessen Hilfe können geometrische Informationen im Anlauf- und Absprungbereich sowie in der Flugbahn mit Zentimetergenauigkeit bestimmt werden. Zusätzlich sind Geschwindigkeitsinformationen verfügbar. Aus diesen Basisgrößen können unter Verwendung weiterer Parameter sportwissenschaftlich interessante Aussagen abgeleitet werden. Von Vorteil ist, dass ein Sprung über den gesamten räumlichen Bereich einer Schanze zusammenhängend erfasst werden kann.

Zentimetergenauigkeit bedingt den Einsatz eines differentiellen GPS-Verfahrens unter Berücksichtigung von Trägerphasenmessungen. Dabei tritt prinzipiell ein Mehrdeutigkeitsproblem der Phasenmessung auf. GPS-Messungen im Skisprung finden i.d.R. unter erschwerten Bedingungen statt. Signalabschattungen durch Berge, Gebäude und Bäume sowie die relativ kurze Messdauer eines Sprungs erschweren eine zuverlässige Mehrdeutigkeitsschätzung bei der GPS-Auswertung. Um dennoch zu verwertbaren Ergebnissen zu gelangen, wurde ein laserbasiertes Zusatzsystem für den Schanzentisch entwickelt, welches wichtige Passpunktinformationen für den Auswerteprozess bereitstellt.

¹Dieses Projekt wurde mit Forschungsmitteln des Bundesinstituts für Sportwissenschaft unter dem Geschäftszeichen VF 08/06/01/2004 gefördert.

2 Prinzip der satellitengestützten Positionsbestimmung

Das US-amerikanische *NAVSTAR Global Positioning System* (kurz: GPS) besteht aus einer nominellen Anzahl von 24 Satelliten, die die Erde in einer mittleren Höhe von 24000 km umkreisen. Jeder dieser Satelliten verfügt über ein hochgenaues Zeitnormal. Es kommen Rubidium- und Cäsium-Atomuhren zum Einsatz. Der Uhrstand zum Aussendezeitpunkt wird in Form von *Pseudo Random Noise-Codes* (PRN) auf die beiden kontinuierlich abgestrahlten Trägerfrequenzen von 1,57542 GHz (L1) und 1,22760 GHz (L2) aufmoduliert. Die Signale sind weltweit zu jeder Zeit und unabhängig vom Wetter empfangbar.

GPS-Empfänger sind in der Lage, Signale von allen sichtbaren Satelliten gleichzeitig zu empfangen. Eine interne Empfängeruhr bestimmt die Ankunftszeit jedes einzelnen Signals. Aus der Differenz von Ankunfts- und Aussendezeitpunkt ergibt sich die Signallaufzeit von ca. 70 ms. Über die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit wird daraus die Strecke zwischen Sender und Empfänger berechnet.

In den Satellitensignalen sind neben den Uhrzeiten auch Bahnparameter enthalten. Damit kann für den Zeitpunkt einer Messung die Orbitposition eines jeden Satelliten im Referenzsystem WGS-84 berechnet werden. Die gesuchte Position der Empfangsantenne ergibt sich somit aus der Lösung des folgenden nichtlinearen Gleichungssystems, vgl. Abb. 1.

$$r_i^j = \|\boldsymbol{\rho}^j - \mathbf{R}_i\| \quad (1)$$

mit:

\mathbf{R}_i Ortsvektor der gesuchten Empfängerposition i

$\boldsymbol{\rho}^j$ Ortsvektor zum Satellit j

r_i^j gemessene Strecke zwischen Satellit j und Empfangsantenne i

Die Uhr des GPS-Empfängers ist nicht ausreichend genau mit der Satellitenzeit synchronisiert. Somit enthalten die gemessenen Signallaufzeiten den bisher unbekanntem Empfängeruhrfehler. Die Strecken werden deshalb als Pseudostrecken bezeichnet. Die Positionsbestimmung erfolgt über die an einer Näherungsposition linearisierten Beobachtungsgleichungen. Ein schnell konvergierendes Iterationsverfahren verbessert die Näherungsposition des Empfängers schrittweise. Durch Einführung von Messwerten zu einem vierten Satellit wird der unbekanntem Empfängeruhrfehler mitgeschätzt.

$$\Delta\boldsymbol{\rho} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{L} \quad (2)$$

mit der Designmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & a_{t1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & a_{t2} \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & a_{t3} \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & a_{t4} \end{pmatrix}$$

$$a_{xj} = \frac{X_{Satj} - X_{Empfi}}{r_i^j} \quad a_{yj} = \frac{Y_{Satj} - Y_{Empfi}}{r_i^j} \quad a_{zj} = \frac{Z_{Satj} - Z_{Empfi}}{r_i^j} \quad t_i = -c$$

und

$\Delta\rho$ Verbesserungsvektor der Messwerte

c Lichtgeschwindigkeit

L gekürzter Beobachtungsvektor

Dieses Verfahren benutzt die Codemessung (C/A-Code) zur Bestimmung der Entfernung zwischen Satelliten- und Empfangsantenne. Die Wellenlänge des C/A-Codes beträgt rund 300 km. Damit ist die Position eindeutig bestimmbar. Das Verfahren wird als Absolutpositionierung bezeichnet.

Die Genauigkeit einer absolut bestimmten Position hängt unter anderem von den zeitlich variierenden Signalverzögerungen in der Ionosphäre und der Troposphäre ab. Zusätzlich können Signalreflexionen an Gebäudefassaden oder Metallteilen zu Verschlechterungen der Laufzeitmessung führen. Durch Glättungs- und Filtertechniken kann die Positionierung geringfügig verbessert werden.

Alternativ zu den Codemessungen können ebenso Messungen der Phasenlage der Trägerwelle(n) herangezogen werden. Dies ist jedoch den geodätischen GPS-Empfängern vorbehalten. Die Auflösung der Phasenmessung ist deutlich höher, jedoch ergibt sich ein Mehrdeutigkeitsproblem.

$$\Phi = r - \lambda N + \epsilon \quad (3)$$

mit:

Φ aktuelle Phasenlage der Trägerwelle L1 oder L2 [m]

N Anzahl ganzer Wellenlängen für L1 bzw. L2 (Integer)

λ Wellenlänge L1 \approx 19 cm, L2 \approx 24 cm

r Entfernung Satellit - Empfangsantenne [m]

ϵ Restfehlerterm [m]

Aufgrund von nicht ausreichend genau modellierbaren ionosphärischen und troposphärischen Refraktionseinflüssen sowie des Rauschens der Empfängeruhr (preiswerte Quarzuhr) ist die Bestimmung von N nicht möglich. Deshalb werden andere Mess- und Auswertestrategien benötigt.

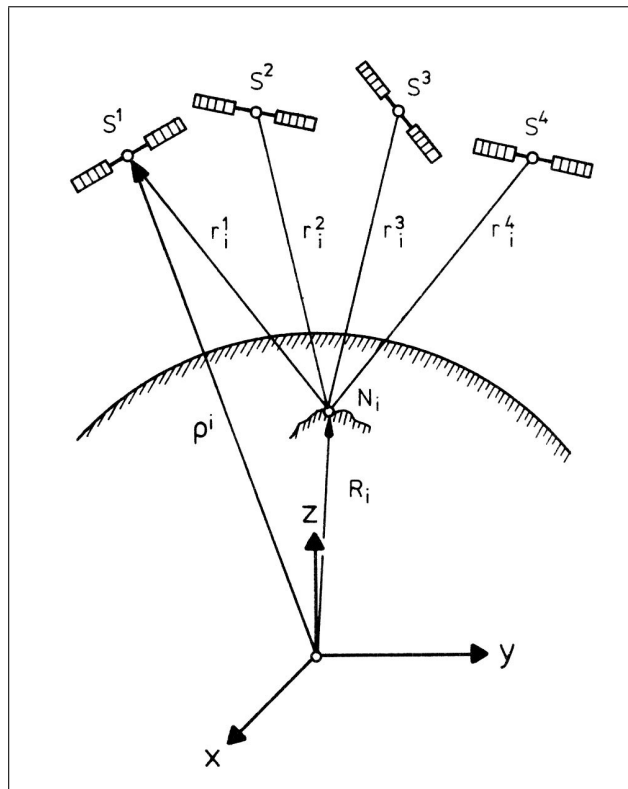


Abb. 1: Prinzip der Positionsbestimmung mit GPS

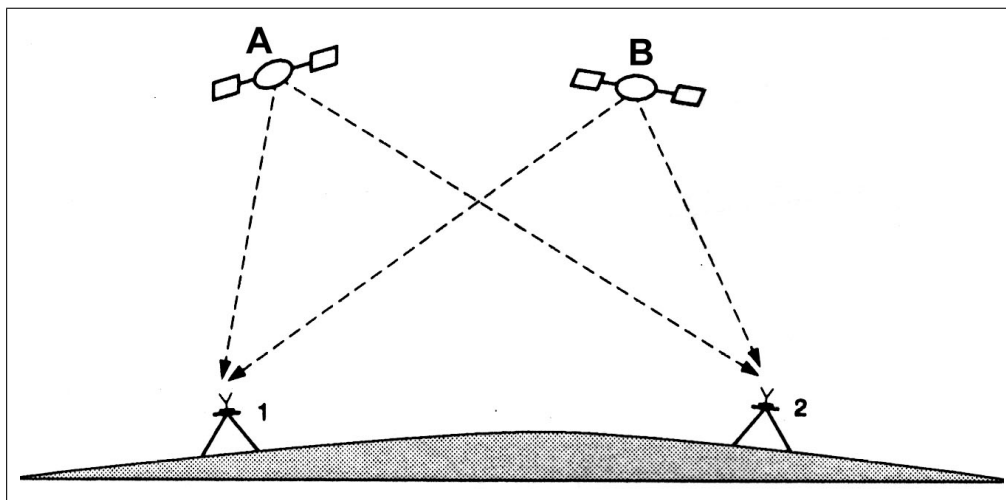


Abb. 2: Doppeldifferenzbildung der GPS-Messwerte

3 Zentimetergenaues Differential-GPS

Befinden sich zwei GPS-Empfänger im Abstand von ca. 0-5 km zueinander, durchlaufen die Satellitensignale nahezu die gleichen ionosphärischen und troposphärischen Schichten der Atmosphäre. Dabei sind die Refraktionsbedingungen auf beiden Signalwegen stark korreliert. Ein rechnerisch gebildetes Differenzsignal ist daher in erster Näherung frei von Ausbreitungsfehlern (Kleusberg and Teunissen, 1996). Ebenso eliminieren sich Satellitenuhr- und Satellit-

tenbahnfehler. Diese neu entstandene Messgröße wird als Empfänger-Einfachdifferenz bezeichnet.

Analog dazu können Satelliten-Einfachdifferenzen für je zwei Satelliten und einen Empfänger gebildet werden. Dabei wird der Empfängeruhrfehler eliminiert. Werden nun Differenzen dieser Einfachdifferenzen gebildet, entsteht eine Messgröße, die nur noch den gesuchten Koordinatenunterschied beider Empfangsantennen und die Mehrdeutigkeitsterme enthält und als Doppeldifferenz bezeichnet wird (Abb. 2). Für die Berechnung zentimetergenauer Positionsdifferenzen werden die Doppeldifferenzen aus den (mehrdeutigen) Trägerphasenmessungen gebildet.

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta r_{1,2}^{A,B} - \lambda_i \nabla\Delta N_{1,2}^{A,B} + \epsilon_{\nabla\Delta} \quad (4)$$

mit:

A, B	Satellitenindex
$1, 2$	Stationsindex
$\nabla\Delta\Phi$	Doppeldifferenz-Phasenmessung der Trägerwelle L1 oder L2 [m]
λ	Wellenlänge L1 ≈ 19 cm, L2 ≈ 24 cm
$\nabla\Delta N$	Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeitsterm (Integer)
$\epsilon_{\nabla\Delta}$	Restfehlerterm [m]
$\nabla\Delta r$	gesuchter Koordinatenunterschied [m]

Ziel der GPS-Auswertung ist es, die unbekannte Anzahl N ganzer Wellenlängen für jedes Satellitensignal zu ermitteln. Je nach Typ der Messung werden statische oder kinematische Berechnungs- und Schätzverfahren eingesetzt. Aufgrund der sich nur relativ langsam verändernden Satellitengeometrie ist die numerische Lösung des Gleichungssystems bei kurzen Messreihen jedoch wenig redundant. Statistische Tests können vielfach falsche und richtige Lösungen nicht zuverlässig voneinander unterscheiden. Abhilfe schafft z.B. die Verlängerung der Messzeit oder die Initialisierung auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt (Hofmann-Wellenhof et al., 1994)

Wichtigste Forderung ist die, dass über den gesamten auszuwertenden Zeitraum unterbrechungsfreie Messungen durchgeführt werden müssen. Durch Abschattungen verliert der GPS-Empfänger die Phasenbeziehung des Satellitensignals. Wird das Signal neuerlich empfangen, muss i.d.R. die Mehrdeutigkeit N als neuer unbekannter Parameter in die Auswertung eingeführt werden. Das kann unter schwierigen Bedingungen (wenige Satelliten, kurze Messdauer) zu fehlerhaften Lösungen führen.

4 GPS-Einsatz am Beispiel Skispringen

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden Trajektorien und Geschwindigkeitsprofile von Skispringern untersucht. Abb. 3 zeigt den für das Skisprin-

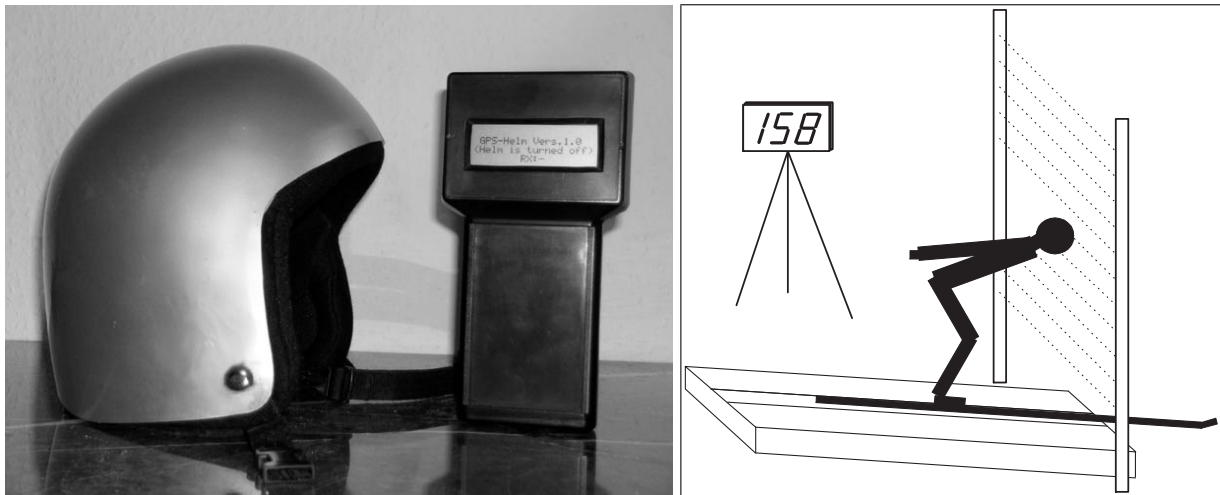


Abb. 3: links: GPS-Helmempfänger für das Skispringen. Die Anzeigeeinheit dient zur Überwachung des Empfängers. rechts: Prinzip der lasergestützten Helmerfassung am Schanzentisch mit dem LLBA16-System

gen entwickelten Spezialhelm. Unter der Helmschale befindet sich eine GPS-Zweifrequenzantenne mit einem geodätischen GPS-Empfänger. Ein Controller basierend auf einem 8-bit-Einchipprozessor steuert den Empfänger und sorgt für die Speicherung der Rohdaten auf einer handelsüblichen CompactFlash-Speicherkarte. Neben der Batterie befindet sich weiterhin ein kleiner Funksender im Helm, der Statusinformationen, wie z.B. aktuelle Satellitenanzahl, Speicherkapazität und Batteriezustand an ein Handgerät mit Display sendet. Die technische Entwicklung der letzten Jahre hat zu immer kleineren, leichteren und leistungsfähigeren GPS-Empfängern geführt. Durch das im Vergleich zu anderen Helmen geringere Ausgangsgewicht des aktuell eingesetzten Sprunghelms war es möglich geworden, die Elektronik komplett im Helm zu integrieren. Damit gibt es keine störende Verkabelung am Athlet. Der Trainingsablauf wird durch die Untersuchungen nicht beeinflusst.

Skispringen ist aus GPS-Sicht im Gegensatz zu anderen bereits untersuchten Feldsportarten, wie z.B. Rudern oder Ski alpin ein kritischer Anwendungsfall. Die Schanzen sind meist nach Norden ausgerichtet und befinden sich in Gebirgstälern. Dadurch ist die Zahl sichtbarer Satelliten stark eingeschränkt. Es sind nicht zu allen Tageszeiten an allen Punkten ausreichend viele Satellitensignale empfangbar. Hinzu kommt, dass die Dauer eines Sprungs deutlich unter einer Minute liegt. Das ist nicht lange genug, um eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung garantieren zu können. Kommerziell angebotene GPS-Auswertesoftware ist i.d.R. nicht in der Lage, unter diesen Extrembedingungen Lösungen zu berechnen (Blumenbach, 2003).

Kann die Position und die dazugehörige Uhrzeit des Antennenphasenzentrums der GPS-Helmantenne an einem Punkt (Initialisierungspunkt) im Verlauf des Sprungs unabhängig von GPS ausreichend genau bestimmt werden, lassen sich alle Mehrdeutigkeitsparameter direkt berechnen. Nun kann der Umstand

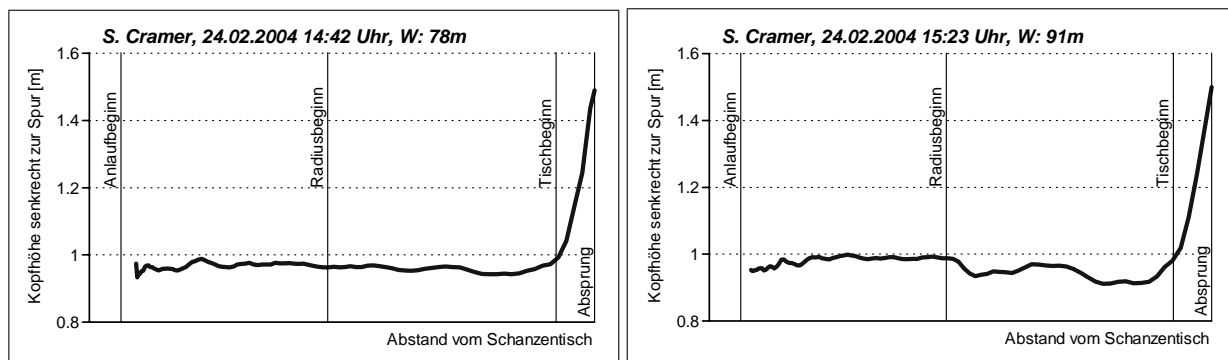


Abb. 4: Anfahrtshöhe des Kopfes senkrecht zur Spur.

ausgenutzt werden, dass die Mehrdeutigkeitsparameter bei unterbrechungsfreier Messung zeitlich konstant sind. Das Segment wird vom Initialisierungspunkt aus zeitlich rückwärts (Anlaufbereich) und vorwärts (Flugphase) prozessiert und anschließend zusammengesetzt.

Zur unabhängigen Positionsbestimmung wurde das Laserlichtschrankensystem *LLBA16* entwickelt. Am Schanzentisch erfassen 16 einzelne Lichtstrahlen den zeitlichen Verlauf des Kopfdurchgangs des Athleten beim Absprung, vgl. Abb. 3. Mit einer Abtastrate von 4 kHz ist bei typischen Anfahrsgeschwindigkeiten um 90 km/h eine räumliche Auflösung in Sprungrichtung von rund 7 mm möglich. Die Lagekomponente quer zum Anlauf ist durch die Anlaufspur selbst vorgegeben. Die Höhe des Helmes wird durch die Lichtschrankenanordnung ermittelt. Aus dem zeitlichen hell-/dunkel-Verlauf der Lichtschranken kann der Durchgang des Phasenzentrums der in den Helm integrierten GPS-Antenne bestimmt werden.

Mit Hilfe der GPS-Messungen lässt sich die Bahn und die Geschwindigkeit des Kopfes des Athleten bestimmen. Für numerische Simulationen im Bereich Skisprung wird i.d.R. von der Bewegung des Körperschwerpunkts KSP ausgegangen. Um die Werte vom Kopf auf den KSP zu zentrieren, wurden zeitgleich durchgeführte kinemetrische Messungen mit bis zu 8 Kameras herangezogen. Aus digitalisierten Videohalbbildern wurde der Vektor zwischen Kopf und KSP und dessen zeitliche Veränderung bestimmt. Die GPS-Ergebnisse wurden anschließend entsprechend zentriert.

Die folgenden Grafiken zeigen ausgewählte Parameter, die aus GPS-Messungen bestimmt wurden. Abb. 4 stellt den zeitlichen Verlauf des Abstands Kopf-Spur dar. Besonders im rechten Diagramm ist eine unerwünschte Auftaktbewegung vor dem Absprung zu erkennen.

Eine weitere Grafik zeigt den bisher wenig untersuchten Verlauf der Flugbahn in der Horizontalebene. Gelingt es dem Athlet, einen Sprung auf der verlängerten Anfahrtslinie durchzuführen, ergeben sich bis zu 0,5 m Weitenvorteil gegenüber Sprüngen mit ausgeprägter seitlicher Drift.

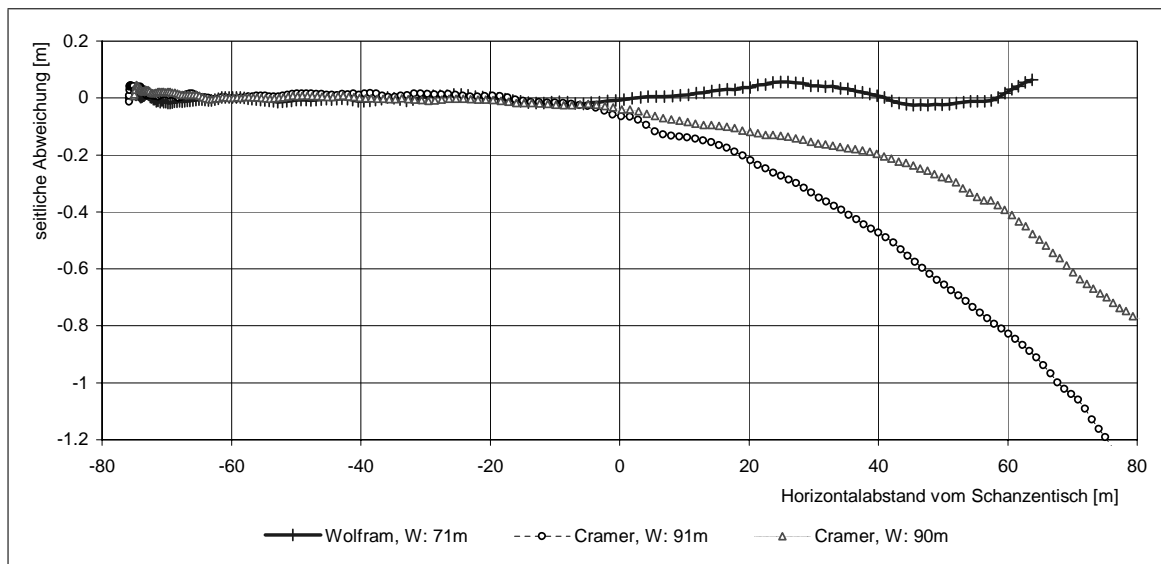


Abb. 5: Seitliche Abweichung von der Spur. Die Ordinaten-Null-Linie entspricht der Spur.

5 Zusammenfassung

Dank der technischen Entwicklung im Hardware-Bereich stehen heute moderne, kleine und leichte Sensoren zur Verfügung, die durchaus auch am Athlet angebracht werden können. GPS-basierte Messsysteme bieten den Vorteil, dass großräumige Untersuchungsgebiete, wie z.B. Regattastrecken oder Sprungschanzen abgedeckt werden können.

Von Nachteil ist die Forderung nach freier Sicht zum Himmel. Es müssen mindestens 4 Satelliten gleichzeitig und unterbrechungsfrei gemessen werden können. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Satellitensignale wirken Bäume, Gebäude und auch der menschliche Körper selbst als Signalabschattung. Somit sind die Einsatzorte durch Randbedingungen eingeschränkt.

Präzise Positionierung mit GPS bedeutet, dass Trägerphasenmehrdeutigkeiten korrekt bestimmt werden müssen. Dazu ist eine ausreichend lange Messdauer notwendig. Ist dies auf Grund der Eigenart der sportlichen Bewegung nicht gegeben, können Zusatzgeräte, wie z.B. das Laserlichtschrankensystem LLBA16 dazu beitragen, Mehrdeutigkeiten zu bestimmen.

Ein weiterer Ansatz zur Überwindung systembedingter Grenzen besteht darin, GPS mit Inertialsensorik zu koppeln (Wagner, 2003). Zeitlich hochauflösende Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitssensoren liefern kurzzeitstabile Informationen über die Lage der Trägerplattform im Raum. Die Positionierung mit Hilfe von GPS hat in diesem Fall eine stützende Funktion, denn die Ergebnisse der Inertialsensorik allein driften mit der Zeit in zufällige Richtungen.

Literatur

- Blumenbach, T. (2003). GPS-Anwendungen in der Sportwissenschaft. In *Ta- gungsband POSNAV 2003 DGON Symposium Positionierung und Navigation 2003 Dresden*, pages 345–352.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (1994). *”Global Posi- tioning System Theorie and Practice”*. Springer-Verlag Wien New York, third, revised edition edition.
- Kleusberg, A. and Teunissen, P. (1996). *”GPS for Geodesy”*, volume 60 of *Lecture notes in earth science*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wagner, J. F. (2003). *Zur Verallgemeinerung integrierter Navigationssysteme auf räumlich verteilte Sensoren und flexible Fahrzeugstrukturen*. VDI-Verlag Düsseldorf.