
Satellitennavigation in der Sportwissenschaft

T. Blumenbach², T. Henke (Projektleiter)¹,

W. Augath², H. Heck¹

¹ Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Sportmedizin;

² Technische Universität Dresden

Geodätisches Institut

1 Problem

„Schneller, höher, weiter“ lautet das olympische Motto. Seit langem gibt es Bemühungen von Biomechanikern und Sportwissenschaftlern, die Leistung eines Athleten exakt zu erfassen und zu dokumentieren (TERRIER 2000). Einerseits, um den Bewegungsablauf besser studieren zu können, andererseits, um gezielt Trainingsmethoden nach dem neuesten Stand der Forschung entwickeln zu können.

Dabei kommen eine Reihe verschiedenartiger, z.T. sehr aufwendiger Messmethoden zum Einsatz: Zeitmessungen, Streckenmessungen, Kraftmessungen, Videoaufzeichnungen usw., die teilweise aber nur indirekt Aufschluss über zu optimierende Kenngrößen geben können. Als Beispiel sei hier die Videoaufzeichnung beim Riesenslalom genannt, die nur subjektive Aussagen über die Einhaltung einer optimalen Fahrspur ermöglicht.

In den letzten Jahren sind für das von den USA installierte GPS-System (global positioning system) eine zunehmende Zahl von Anwendungsmöglichkeiten entwickelt worden. Im Zuge dieses Fortschritts sind immer kleinere und leistungsfähigere GPS-Empfänger auf den Markt gekommen. Es lag deshalb nahe, deren Einsatzmöglichkeiten und Grenzen bei Sportarten unter freiem Himmel zu untersuchen. Ähnliche Experimente mit Skifahrern wurden bereits in Österreich (LICHTENEGGER 1997) und in der Schweiz (LADETTO 2000) durchgeführt. Positionsinformationen, wie sie durch kontinuierliche hochfrequente GPS-Messungen erzeugt werden können, eröffnen völlig neue Möglichkeiten für biomechanische Analysen im Leistungssport.

2 Methode

Um mit GPS in den Zentimeter-Genauigkeitsbereich zu gelangen, benötigt man in jedem Fall ein Differentialverfahren. Zudem muss der Empfänger beide Trägerphasen messen können. Im Auswerteprozess sind die dabei auftretenden unbekanntenen Phasenmehrdeutigkeiten

zuverlässig zu bestimmen. Die Messrate sollte möglichst hoch sein, damit auch bei schnelleren Bewegungen eine ausreichende Punktdichte in der Bewegungskurve gewährleistet ist. Als weitere Kriterien sind Masse und Volumen von Antenne und Empfänger zu nennen. Während diese für Messungen z.B. im Ruderboot fast unkritisch sind, hat ein Zusatzgewicht direkt am Athleten fast immer eine Rückwirkung auf seine Leistungsfähigkeit. Damit könnte ein Einsatz unter Wettkampfbedingungen problematisch sein.

Die an der TU Dresden verfügbaren geodätischen Zweifrequenzempfänger (Typ Trimble 4700, max. Messfrequenz 5 Hz) genügen zumindest für erste Tests den genannten Anforderungen.



Abb. 1: Skihelm mit Zweifrequenzantenne

Als Antenne wurde ein kleines Zweifrequenzmodell aus der Luftfahrt verwendet. Abbildung 1 zeigt den Antennenaufbau auf einem handelsüblichen Skihelm, wie er für die Messungen beim Skispringen und Riesenslalom eingesetzt wurde. Im Ruderboot konnte die Antenne direkt auf der Bootshaut montiert werden. Für kommende Messungen wird ein noch kleineres Zweifrequenzmodell eingesetzt werden können.

Als lokale Referenzstation können auch Empfänger eingesetzt werden, die nicht über eine so hohe Messrate verfügen. Nach aktuellem Kenntnisstand (WANNINGER 2000) können die höherfrequenten Referenzdaten ohne Genauigkeitsverluste durch Interpolation z.B. aus Sekundendaten erzeugt werden.

3 Untersuchungen und Ergebnisse

Rudern

Bislang werden für biomechanische Untersuchungen und auch zur turnusmäßigen Erstellung von Leistungsprofilen der Athleten im Rahmen der KLD (komplexe Leistungsdiagnostik) speziell ausgerüstete Messboote eingesetzt. Man ist damit in der Lage, differenziert biomechanische Parameter zu erfassen, die das Ruderboot, die Athleten sowie deren Zusammenspiel betreffen. Ziel ist es, den Bewegungsablauf, den Krafteinsatz sowie die Syn-

chronisation innerhalb der Mannschaft so zu optimieren, dass ein Wettkampferfolg möglich wird.

Für die Athleten jedoch bedeutet der Einsatz von Messbooten immer eine zusätzliche psychische, evtl. auch physische Belastung, da sie in einem fremden Sportgerät mit vielen technischen Einbauten arbeiten, welches in der Regel auch andere Fahreigenschaften als das Wettkampfgerät aufweist. Somit ist eine Messung wichtiger Parameter in Wettkämpfen praktisch nicht möglich.

Der Einsatz von GPS zur präzisen Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung erfordert einen neuen, ganzheitlichen Denkansatz. Nicht der Athlet, sondern das gesamte Boot ist das zu betrachtende Objekt mit einer individuellen variablen Geschwindigkeit auf einer individuellen Fahrspur zwischen Start und Ziel. Es ist also möglich, die zu optimierende Größe, die Geschwindigkeit des Bootes, direkt zu messen. Von Vorteil ist, dass Messungen sowohl im Training als auch im Wettkampf im eigenen Boot des Athleten möglich sind.

Bei den Messungen am Bundesleistungszentrum Dortmund wurden mit Mitgliedern der Juniorenmannschaft Riemen-Zweier zahlreiche Testfahrten durchgeführt. Untersucht wurde, ob verschiedene Fahraufgaben als charakteristische Verläufe im Geschwindigkeitsprofil wiedererkennbar sind. Dazu wurde eine ausgewählte Anzahl an Einzelschlägen in einem Diagramm übereinander gelegt.

Ein Vergleich der Abbildungen 2 und 3 zeigt, dass es signifikante Unterschiede im Geschwindigkeitsverlauf verschiedener Fahraufgaben gibt. Bei höherer Schlagfrequenz ist nicht nur die Beschleunigung des Bootes größer, auch das Geschwindigkeitsniveau insgesamt ist höher. Aus der guten Übereinstimmung der jeweils übereinander gelegten Einzelgraphen wird ersichtlich, dass die Mannschaft über einen längeren Zeitabschnitt gleichmäßig gearbeitet hat.

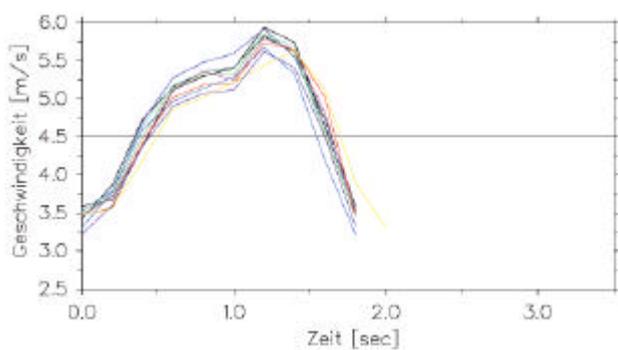


Abb. 2: Fahrgeschwindigkeit innerhalb von Schlagzyklen (übereinander gelegt) beim Ausdauertraining

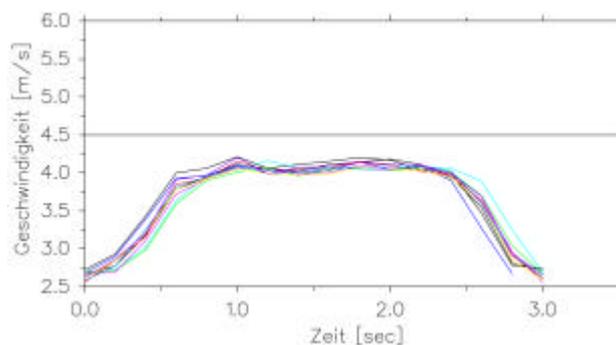


Abb. 3: Fahrgeschwindigkeit innerhalb von Schlagzyklen (übereinander gelegt) bei Schlagfreq. 32/min

Der zeitliche Abstand zweier Einzelmesspunkte beträgt 0,2 Sekunden. Dabei ist das Zeitraster aber (noch) nicht an einen Triggerpunkt in der Ruderbewegung (z.B. an den Augenblick des Eintauchens) gekoppelt. Mit anderen Worten, die übereinander gelegten Einzelkurven müssten entlang der Zeitachse so verschoben werden, dass alle Graphen in einem gemeinsamen Zeitpunkt innerhalb des Bewegungsablaufes beginnen. Dazu ist aber eine Auflösung von 0,2 Sekunden zu grob.

Ein weiterer Aspekt ist die direkte Rückmeldung von Messwerten zur Mannschaft im Boot. Über ein geeignetes Display könnten z.B. die in Abbildung 4 dargestellten Parameter Geschwindigkeit, mittlere Geschwindigkeit und akkumulierte Fahrstrecke angezeigt werden. In Training oder Wettkampf ließe sich dadurch die Leistung besser an die aktuellen Erfordernisse anpassen.

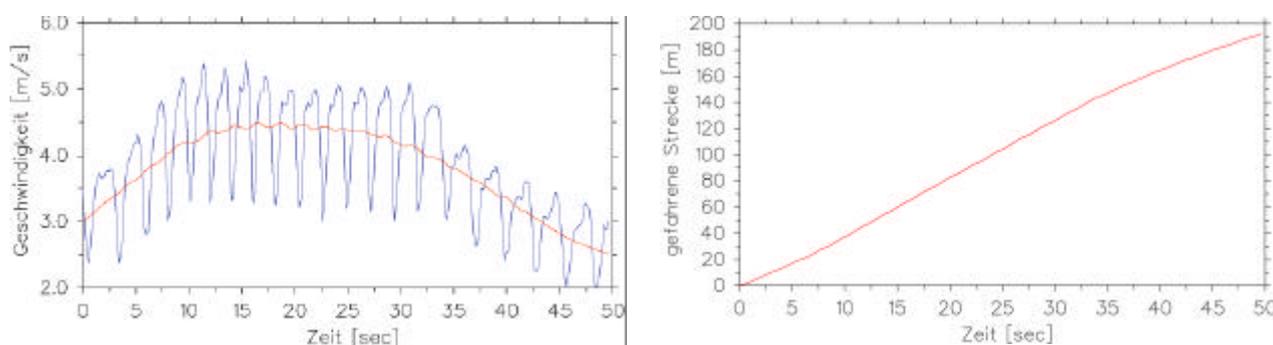


Abb. 4: Aktuelle und mittlere Geschwindigkeit (links) und zugehörige akkumulierte Strecke (rechts) einer Testfahrt

Skisprung

Eine weitere Feldsportart, die im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht wurde, ist das Skispringen. Messungen wurden an Springern der Nationalmannschaft am Bundesleistungszentrum Oberstdorf vorgenommen.

Beim Skispringen sind verschiedene Sprungphasen zu unterscheiden. Der Athlet wird während des Anlaufs beschleunigt. Direkt am Schanzentisch wird üblicherweise mit Hilfe einer Lichtschranke die Absprunggeschwindigkeit gemessen. Dann erfolgt der Absprung und der Übergang in die Flughaltung, eine Phase, die wesentlichen Einfluss auf die Sprungweite hat. Die Flugphase wird durch die Landephase abgeschlossen, die aus strömungstechnischer Sicht kritisch ist. Laminare Strömung wechselt über in Turbulenzen. Die Auftriebskräfte ändern sich schlagartig.

Bisher wurde bei wissenschaftlichen Untersuchungen vor Ort mit Videoaufzeichnungen, z.T. auch sehr aufwendig mit mehreren Messkameras gearbeitet. Die anschließende photogrammetrische Auswertung ist ebenfalls zeitintensiv. Ergebnisse sind in der Regel erst nach Tagen verfügbar. Die Auswertung der Videoaufzeichnungen ist zeitraubend und teil-

weise auch nur subjektiv möglich. Mit einer GPS-Antenne auf dem Helm und einem Empfänger unter dem Sprunganzug ist der Aufwand zur kinematischen Positionsbestimmung vergleichsweise gering (Abb. 5). Und es können, sofern die Empfangsantenne nicht zu stark abgeschattet wird, sämtliche Phasen eines Sprunges direkt gemessen werden. Besonders die ersten Meter nach dem Schanzentisch sowie die Landephase stehen dabei im Mittelpunkt des Interesses. Von Vorteil ist, dass die Resultate bei einer sofortigen Auswertung unmittelbar nach dem Sprung zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zum Rudersport sind hier keine zurückgelegten Streckenlängen von Interesse.



Abb. 5: Springer am Start. Der Empfänger befindet sich unter dem Sprunganzug auf dem Rücken

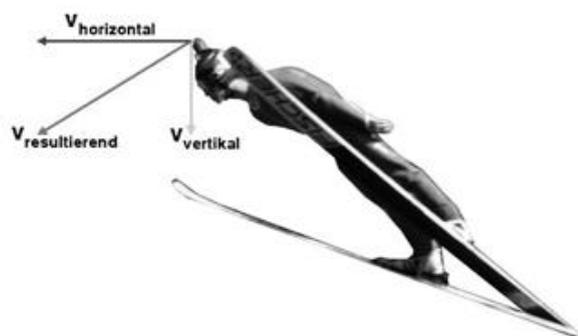


Abb. 6: Geschwindigkeitsvektoren

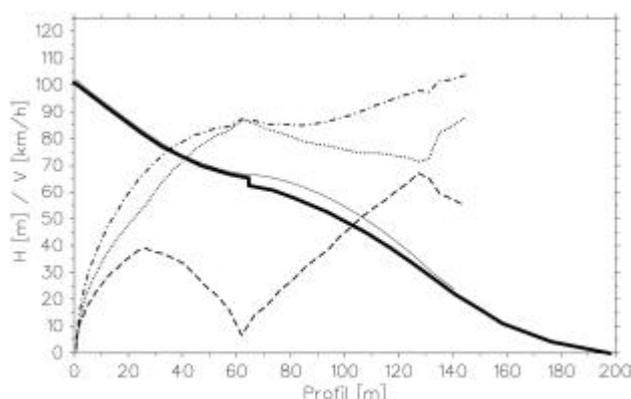


Abb. 7: Geschwindigkeitskomponenten eines Testsprungs, aufgetragen über dem Profil der 90-Meter-Schanze in Oberstdorf.

- Schanzprofil
- Horizontalgeschwindigkeit
- Sinkgeschwindigkeit
- · - · - Gesamtgeschwindigkeit

Die Sprungweiten werden auch zukünftig von den Weitenrichtern ermittelt. Vielmehr richtet sich das Augenmerk auf die Geschwindigkeitskomponenten (Abb. 6) des Athleten während der Flugphase. Abbildung 7 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf eines Testsprungs. Die fette schwarze Linie stellt das Schanzprofil dar. Die dünnere Linie ist die Bahn des Athleten, genaugenommen die Bahn des Kopfes des Athleten. Horizontal- und Vertikalachse haben eine metrische Einteilung und sollen zur besseren Veranschaulichung der Geometrie dienen. Sie stellen keine Sprungweite des Athleten dar. Die Messmethode ist aufgrund des schleifenden Schnitts mit dem Schanzprofil zur Weitenmessungen nicht geeignet.

Zu Beginn des Anlaufs steigt die Geschwindigkeit kontinuierlich an. Im Bereich des Anlaufradius nimmt der Neigungswinkel der Schanze ab. Deshalb sinkt die vertikale Geschwindigkeitskomponente bis zu ihrem

Minimum am Absprungpunkt. Da aber der Athlet weiter beschleunigt wird, erreicht die Horizontalgeschwindigkeit am Absprungpunkt ihr absolutes Maximum.

Nun beginnt die Flugphase. Die Sinkgeschwindigkeit wird wegen des freien Falls stetig größer, die Horizontalgeschwindigkeit nimmt ab. Insgesamt aber beschleunigt der Athlet weiter, zu erkennen am Ansteigen der Resultierenden. Als Optimierungsfaktoren zum Erreichen einer großen Weite können nun folgende Bedingungen abgeleitet werden.

- Die Horizontalgeschwindigkeit im Absprungpunkt soll ein Maximum sein.
- Die Sinkgeschwindigkeit im Absprungpunkt soll zum Minimum werden.
- In der Flugphase soll die Horizontalgeschwindigkeit möglichst wenig abnehmen.
- In der Flugphase soll die Sinkgeschwindigkeit möglichst langsam zunehmen.

Setzt der Athlet auf den Hang auf, ergeben sich deutliche Knickpunkte in den Graphen der Horizontal- und Vertikalgeschwindigkeiten. Hier endet der zu untersuchende Sprung. Die satellitengestützte Positionierung bietet die Möglichkeit, u.a. Optimierungsparameter direkt aus den Messwerten abzuleiten. Damit ist eine objektive Möglichkeit zur Dokumentation der athletischen Leistung gegeben.

Ski alpin

Die Frage, wie schnell war der Athlet am Tor X oder Y, an welcher Stelle hat er Zeit eingebüßt oder herausgefahren, kann mit den klassischen Zeitmessanlagen (Lichtschranke) nicht und mit videotechnischen Analysen nur für kurze Streckenabschnitte und unter großem technischem Aufwand beantwortet werden. Deshalb lag es nahe, Möglichkeiten und Grenzen von GPS auch in dieser Sportart zu untersuchen.

Testmessungen wurden auf der FIS-homologisierten Riesenslalomstrecke auf dem Zugspitzplatt durchgeführt (Abb. 8). Ein Fahrer der Ski-Nationalmannschaft stand für die Testmessungen zur Verfügung. Der Athlet erhielt eine individuelle Aufgabenstellung für jeden Lauf, z.B. Abfahrt mit maximaler Geschwindigkeit, Abfahrt auf der geometrisch kürzesten Linie (Ideallinie), Abfahrt in großen Bögen usw. Das Messsystem lieferte die zugehörigen Positionierungen. Die Zeitmessung erfolgte mit einer Lichtschranke auf 1/100 Sekunde.



Abb. 8: Testabfahrt

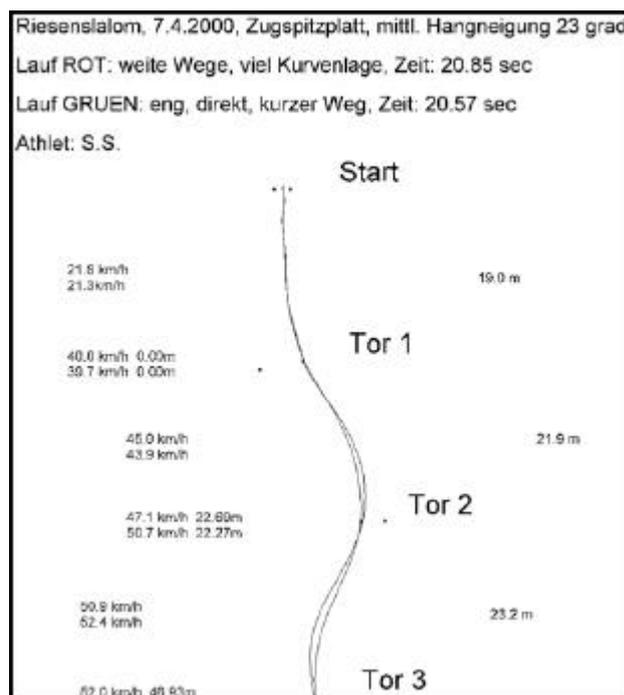


Abb. 9: Vergleich zweier Fahrspuren, Ausschnitt aus der Bildschirmdarstellung

Abbildung 9 zeigt einen Teil der Ergebnisdarstellung die sich an der direkten visuellen Vergleichbarkeit zweier Fahrspuren orientiert. Zu erkennen sind die Tore sowie die Fahrspuren mit Geschwindigkeitsparametern und zurückgelegten Wegstrecken entlang der tatsächlichen Fahrspur. Die Spuren verschiedener Läufe unterscheiden sich zum Teil nur um wenige Zentimeter. Es ist deshalb eine Frage des Darstellungsmaßstabs, ob man diese Differenzen in der Grafik erkennen und beurteilen kann. Mit Hilfe der Virtual Reality Modeling Language (VRML), einer Beschreibungssprache für räumliche Objekte, kann das Maßstabsproblem bei der Visualisierung recht gut gelöst werden. Es wird ein verebnetes (oder auch räumliches) geometrisches Modell berechnet, welches interaktiv auf einem PC mit Standard-Internetbrowsern angezeigt und interpretiert werden kann. Der Darstellungsmaßstab kann dabei vom Betrachter kontinuierlich verändert werden, um größere oder kleinere Ausschnitte eines Laufes analysieren zu können. Es besteht die Möglichkeit, schnell zwischen vordefinierten Ansichten umzuschalten. Man erhält so entweder einen Überblick über die Gesamtsituation, oder aber einen Einblick in die Details. Eine Darstellung auf Papier ist prinzipiell möglich, kann aber diese Vorteile nicht bieten.

Bei einer Gegenüberstellung der Fahraufgaben Maximalgeschwindigkeit und Ideallinie konnte folgendes festgestellt werden. Der Fahrweg bei Maximalgeschwindigkeit war länger als der der Ideallinie. Die Geschwindigkeit war jedoch um so viel höher, dass nicht nur der längere Weg ausgeglichen werden konnte. Es wurde auch ein signifikanter Zeitvorsprung von

knapp 0,2 Sekunden herausgefahren. Die Fahrt auf der Ideallinie hätte im Wettkampf also nicht zum Sieg geführt. Ursache dafür ist, dass die Ideallinie steiler durch den Hang verläuft. Der Athlet muss stärker abbremsen, um innerhalb der Tore zu bleiben. Größere Radien können mit deutlich höheren Geschwindigkeiten und in diesem Fall in kürzerer Zeit befahren werden, da die Fliehkräfte geringer ausfallen. In weiteren Tests sollte nun untersucht werden, wo das Optimum der Fahrspur liegt.

4 Diskussion

Die Testmessungen haben gezeigt, dass sich über Methoden der Satellitennavigation zum Teil neue Betrachtungsmöglichkeiten zur ruderspezifischen Technik ergeben. Unter folgenden Aspekten ist der Einsatz interessant:

- Als präzises Geschwindigkeits- und Wegmesssystem zur Dokumentation im Wettkampf. Dies ist nur möglich, da das System ohne Rückwirkung auf Athlet und Boot arbeitet.
- Als Geschwindigkeits- und Wegmesssystem im Training. Besonders bei Fahrten auf offenen Gewässern bestehen Schwierigkeiten bei der Einstellung auf den angestrebten Geschwindigkeitsbereich sowie bei der Erfassung der zurückgelegten Strecke. Es wäre denkbar, eine Art Rudercomputer im Boot mitzuführen, etwa analog den im Radsport verwendeten Fahrradcomputern.

Ein Einsatz als ergänzendes Messsystem zur Geschwindigkeitserfassung in bereits bestehenden Messbooten erscheint jedoch nicht sinnvoll, da die dort vorhandenen umfangreichen Messmöglichkeiten zur Erfassung biomechanischer Parameter der Rudertechnik hochspezifische Ergebnisse liefern.

Hinsichtlich des Skisprungs ist es für den routinemäßigen Einsatz im Training erforderlich, das Gewicht der Ausrüstung deutlich zu reduzieren. Die Antenne auf dem Helm muss so gestaltet werden, dass der Athlet nicht beeinflusst wird.

Es ist zu beachten, dass in den im Skisprung gewonnenen Geschwindigkeitsprofilen auch Effekte enthalten sind, die äußeren Einflüssen, z.B. der aktuellen Windsituation zuzuschreiben sind. Soll ein Sprung genauer analysiert werden, müssen diese Störgrößen gesondert betrachtet werden. Anhand einer parallel laufenden Videoaufzeichnung des Sprunges kann ermittelt werden, ob, wann und wie der Athlet beim Auftreten einer Windböe reagiert hat.

Im Anwendungsbereich Ski alpin ist die Fahrspur der Ski von besonderem Interesse. Wenn bisher von Fahrspur gesprochen wurde, ist genaugenommen die Spur der Antenne auf dem Helm gemeint. Durch enge Kurvenfahrt mit hoher Schräglage des Athleten kann es sogar vorkommen, dass die Spur des Helms innen am Tor vorbeiführt, obwohl der Athlet das Tor

korrekt umfahren hat. Videoaufzeichnungen erlauben es, eventuelle Regelverstöße zu erkennen. Daher sind Slalom und Riesenslalom mit ihren größeren Kurvenschräglagen zur Zeit weniger für den Einsatz von GPS-Methoden geeignet als Super-G oder Abfahrt, wo die Kurveradien weiter und die resultierenden Schräglagen geringer sind.

Getestet wurde auch, ob es durch Antennenmontage auf dem Ski möglich ist, die Position der Skier direkt zu bestimmen. Leider ist durch den schnellen Kantenwechsel verbunden mit einer starken Kippung der Skier keine kontinuierliche Messung möglich gewesen. Zudem schattet der Athlet mit seinem Körper zu viele Satellitensignale ab. Die Zentrierung der Messung vom Helm auf den Ski bleibt ein bisher ungelöstes Problem.

Es kann aber festgehalten werden, dass mit dieser Messmethodik trotzdem sinnvolle Aussagen zur Optimierung von Fahrspuren im alpinen Skisport möglich sind. Geschwindigkeitsinformationen im Zeitraster der Messwerte lassen eine Beurteilung der Fahrtechnik zu. Denkbar wären zudem Gleitversuche mit verschiedenen Skimodellen oder Wachssorten. Mit Rücksicht auf den Aufwand ist der Einsatz im Rahmen von Trainingslagern anzustreben.

Grundsätzliche Verfahrensoptimierungen finden sich im Zusammenhang mit der Reduzierung von Größe und Masse der GPS-Ausrüstung, in der Erhöhung der Abtastrate sowie in der Realisierung eines automatisierten Datenflusses.

Die vorgestellten Tests haben gezeigt, dass unterschiedliche sportwissenschaftliche bzw. biomechanische Fragestellungen durch GPS-gestützte Positionsinformationen beantwortet werden können. Teilweise konnten neue Kriterien für die Beurteilung von athletischen Leistungen aufgezeigt werden. Für den künftigen Einsatz im Sport sind folgende Anforderungen an ein GPS-Messsystem zu stellen:

- kleinere Maße des Empfängers
- kleinere Zweifrequenzantenne
- generelle Gewichtsreduktion
- höhere Abtastrate, z.B. 20 Hz
- vollkommen automatisierter Datenfluss
- Ergebnisse in Echtzeit bzw. wenig später verfügbar
- evtl. Echtzeit-Rückkopplung zum Athlet.

Ein automatisierter Datenfluss bedingt zwangsläufig die Entwicklung spezialisierter Software. Da die Form der Ergebnispräsentation aber stark sportartspezifisch ist, ist in dieser Frage eine enge Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen des Sports unumgänglich und wünschenswert.

5 Literatur

- BLUMENBACH, T.; HENKE, T.: Projektberichte „Satellitenavigation – Anwendungen in der Sportwissenschaft“. Geodätisches Institut TU Dresden 2000 (unveröffentlicht).
- LADETTO, Q. u.a.: GNSS hits the slopes. *Galileo's World Spring (2000)*, 14-23
- LICHTENEGGER, H.; BACIC, Z.; CHENG, P.: Application of DGPS for the establishment of ski racetrack data bases. Contribution to the International Symposium on GIS/GPS 15.-19.9.1997 in Istanbul. Istanbul 1997
- TERRIER, P.U.A.: High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion. *Journal of Biomechanics* 33 (2000), 1717-1722
- WANNINGER, L.: Interpolation von GPS-Beobachtungen. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (2000)* 10, 360-363