DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C **Dissertationen** **Heft Nr. 591**

Thomas Blumenbach

GPS-Anwendungen in der Sportwissenschaft
Entwicklung eines Messverfahrens für das Skispringen

München 2005

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 **ISBN 3 7696 5030 1**

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 591

GPS-Anwendungen in der Sportwissenschaft
Entwicklung eines Messverfahrens für das Skispringen

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Blumenbach

München 2005

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5030 1

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Marstallplatz 8 ● D – 80 539 München

Telefon (089) 23 031 -1113 ● Telefax (089) 23 031 -1283/ -1100

E-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://dgk.badw.de

Prüfungskommission

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Reuter, TU Dresden

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Augath, TU Dresden
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. F. Wagner, Univ. Stuttgart
Univ.-Prof. Dr. A. Neumaier, Ruhr-Univ. Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2005

© 2005 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5030 1

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **5**

Tabellenverzeichnis **6**

Abkürzungsverzeichnis **6**

Danksagung **7**

Kurzfassung / Abstract **8**

1 Einleitung **9**

2 Entwicklung der sportwissenschaftlichen Forschung **10**

2.1 GPS-Einsatz in verschiedenen Sportarten . . . 10
2.2 Aspekte der Forschung im Skispringen . . . 11
2.3 Messverfahren der Biomechanik . . . 12
2.3.1 Kinemetrische Verfahren . . . 12
2.3.2 Anthropometrie und anthropometrische Biomechanik . . . 14
2.3.3 Dynamometrie . . . 14
2.3.4 Elektromyographie . . . 16
2.4 Numerische Skisprung-Simulationen . . . 16
2.4.1 Entwicklungsstufen numerischer Modelle . . . 17
2.4.2 Grundlagen der Modellbildung . . . 17
2.4.3 Inverse Dynamik-Berechnungen . . . 20
2.4.4 Kinemetrische Parameter . . . 21
2.4.5 Windkanaluntersuchungen . . . 21
2.4.6 Simulationsrechnungen zur Optimierung von Skisprungschanzen . . . 22

3 Zur GPS-Mehrdeutigkeitsbestimmung **23**

3.1 Die Beobachtungsgleichungen . . . 23
3.2 Beobachtungsdifferenzen . . . 23
3.3 Linearkombinationen . . . 24
3.4 Die Trägerphasenmehrdeutigkeit . . . 25
3.5 Klassifikation der GPS-Verfahren . . . 25
3.6 Geometrische Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung . . . 26
3.6.1 Methode der sequentiellen vermittelnden Ausgleichung . . . 26
3.6.2 Das Prinzip der Mehrdeutigkeitssuche . . . 26
3.6.3 Suchraumdekorrelation mit der *LAMBDA*-Methode . . . 27
3.6.4 Teststatistik . . . 28
3.7 Geometriefreie Methoden zur Mehrdeutigkeitsbestimmung . . . 28
3.8 Test kommerzieller Software zur kinematischen GPS-Positionierung . . . 29
3.8.1 Test der Software *Trimble Total Control Vers. 2.70* . . . 30
3.8.2 Test der Software *Waypoint GrafNav Vers. 6.02* . . . 30
3.8.3 Test der Software *Trimble GPSurvey Vers. 2.35* . . . 31
3.8.4 Schlussfolgerungen aus den Softwaretests und Praxiserfahrungen . . . 32

4 Hardware-Entwicklungen für ein GPS-basiertes Messverfahren im Skispringen 33
4.1 Anforderungen an das Messsystem . . . 33
4.2 Der GPS-Helmempfänger in den Versionen I und II . . . 33
4.2.1 GPS-Helm Version I . . . 33
4.2.2 Die Weiterentwicklung: GPS-Helm Version II . . . 34
4.2.3 Stromversorgung . . . 36
4.2.4 UHF-Datenkanal zur Echtzeit-Systemüberwachung . . . 37
4.2.5 Der Atmel ATmega128(L) RISC-Prozessor . . . 38
4.2.6 Algorithmen und softwaretechnische Aspekte der Systemsteuerung . . . 40
4.2.7 Die GPS-Helmantenne . . . 42
4.2.8 Qualitätsuntersuchungen zum GPS-Helm II . . . 43
4.3 Das Prinzip der lasergestützten Helmerfassung in der Bewegung . . . 45
4.4 Aufbau und Funktion des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16* . . . 46
4.4.1 Verfahren zur Erhöhung der Störsicherheit . . . 48
4.4.2 Genauigkeitsanalyse des Lichtschrankensystems *LLBA16* . . . 48
4.4.3 Justierung des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16* . . . 51
4.5 Validierung des Gesamtsystems . . . 52

5 Mathematische Modelle zur Datenauswertung 53
5.1 Passpunktberechnung *LLBA16* . . . 53
5.2 Mehrdeutigkeitslösung mit *LLBA16*-Passpunktinformationen . . . 56
5.3 Berechnung des Körperschwerpunkts des Menschen . . . 56
5.4 Messwertzentrierung . . . 58
5.5 Geschwindigkeitstransformation beim Absprung . . . 59
5.6 Zentrifugalkraft im Anlaufradius . . . 60

6 Ausgewählte Ergebnisse 61
6.1 Zur Überprüfung der Sprungweite . . . 61
6.2 Allgemeiner Geschwindigkeitsverlauf eines Sprungs . . . 62
6.3 Untersuchung der Anfahrtshöhe . . . 62
6.4 Kopfhöhe am Schanzentisch . . . 64
6.5 Vertikale Geschwindigkeitsprofile im Absprung-, Übergangs- und Flugbereich . . . 65
6.6 Horizontale Geschwindigkeitsprofile . . . 67
6.7 Seitliche Auslenkung in der Flugphase . . . 67
6.8 Vergleich der Flugbahngeometrie . . . 68

7 Zusammenfassung und Ausblick 70

Literatur 72

Abbildungsverzeichnis

2-1 Klassifikation der biomechanischen Messtechnik . . . 12
2-2 Videobildausschnitt der Sprungaufzeichnung . . . 13
2-3 Dynamometrisch gemessener Kraftverlauf beim Absprung . . . 15
2-4 Kraft-Zeit-Verlauf beim Absprung . . . 15
2-5 Kraftwirkungen auf das System Skispringer während der Flugphase . . . 18
2-6 Kraftwirkungen auf das System Skispringer im Anlaufbereich . . . 19
2-7 Winkel-Zeit-Verlauf beim Absprung . . . 21
3-1 Übersicht ausgewählter Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung . . . 27
4-1 GPS-Helm Vers. I und II . . . 34
4-2 Blockschaltbilder der GPS-Empfänger . . . 35
4-3 Impulsbreitencodierung eines Datenbytes zur drahtlosen Übertragung . . . 37
4-4 Blockdiagramm *ATmega128* . . . 38
4-5 Prinzip einer *state machine* . . . 39
4-6 Aufbau der eingesetzten Zweifrequenzantenne *AeroAntenna AT2775-102* . . . 42
4-7 Elevationsabhängigkeit des Phasenzentrums . . . 43
4-8 Datenvollständigkeit *AeroAntenna*-Antenne in Westausrichtung . . . 44
4-9 Datenvollständigkeit Vergleichsantenne . . . 44
4-10 Datenvollständigkeit *AeroAntenna*-Antenne in Nordausrichtung . . . 45
4-11 Messprinzip des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16* . . . 46
4-12 Blockschaltbild mit Datenfluss des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16* . . . 47
4-13 *LLBA16*-Anzeige und Steuergerät . . . 47
4-14 *LLBA16*-Detektierungsalgorithmus zur Vermeidung von Fehlauslösungen . . . 49
4-15 Zusammenhang ausgelöste Lichtschranke und höchster Punkt des Helms . . . 50
4-16 Kalibrierung *LLBA16* und GPS-Helm . . . 52
5-1 Überblick über den Ablauf der Datenauswertung . . . 53
5-2 Skizze zur Berechnung der Passpunkte des *LLBA16*-Systems . . . 54
5-3 Höhenverbesserung *LLBA16* . . . 55
5-4 Interpolation des *LLBA16*-Passpunktes auf das *GrafNav-Zeitintervall* . . . 56
5-5 Segmentierung des menschlichen Körpers und seine Schwerpunktberechnung . . . 57
5-6 Körperwinkel in der Flugphase . . . 59
5-7 Zur Definition von Anfahrts-, Absprung- und Abfluggeschwindigkeit . . . 60
5-8 Zentrifugalkraft im Anlaufradius . . . 60
6-1 Prinzipieller Geschwindigkeitsverlauf eines Skisprungs . . . 62
6-2 Anfahrtshöhe senkrecht zur Spur, Athlet C. . . . 63
6-3 Anfahrtshöhe senkrecht zur Spur, Athlet W. . . . 63
6-4 Vertikale Absprunggeschwindigkeiten verschiedener Sprünge . . . 65
6-5 Vertikalgeschwindigkeiten einzelner Sprünge . . . 65
6-6 Verlauf der Horizontalgeschwindigkeit verschiedener Sprünge . . . 66
6-7 Seitliche Abweichung von der Spur . . . 67
6-8 Vergleich der Flugbahnhöhen verschiedener Sprünge. . . . 68
6-9 Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalgeschwindigkeit . . . 69

Tabellenverzeichnis

3-1 Auswahl ganzzahliger Linearkombinationen für Zweifrequenz-Phasenmessungen 25
3-2 Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten mit *Trimble Total Control* 30
3-3 Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten mit *Waypoint GrafNav* 31
3-4 Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten mit *Trimble GPSurvey* 32
4-1 Ausgewählte technische Daten der *NovAtel OEM4*-Module 34
4-2 Mittlere Ablage des Antennenphasenzentrums in Metern 43
5-1 Relative Masse der Körpersegmente 58
6-1 Trainingssprünge Athlet C. 61
6-2 Trainingssprünge Athlet W. 61
6-3 Kopfhöhen am Schanzentisch, Athlet C. 64
6-4 Kopfhöhen am Schanzentisch, Athlet W. 64
6-5 Horizontalgeschwindigkeit beim Übergang in die Flughaltung 66
6-6 Momentangeschwindigkeiten im Landepunkt 69

Abkürzungsverzeichnis

ARP	Antennenreferenzpunkt
APZ	Antennenphasenzentrum
ASCII	*American Standard Code for Information Interchange*, 7-Bit Codierung für alphanumerische Zeichen
CEP	*Circular Error Probable*, Fehlermaß, Radius eines Kreises, der 50% aller Werte einschließt
DOP	*Dilution Of Precision*, geometriebedingte Verschlechterung der Genauigkeit bei GPS
DGPS	*Differential GPS*, differentielles GPS mit Referenzstation
DPLL	*Digital Phase Lock Loop*, digitale Phasenverfolgungssschleife
EEPROM	*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*, Speichertechnologie
FIS	*Fédération Internationale de Ski*, Internationaler Skiverband
GPS	vollständig NAVSTAR-GPS, *NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*
ISM	*Industrial, Scientific and Medical*, Frequenzbereich 433 – 434 MHz, in Europa lizenzfrei nutzbar
KAR	*Kinematic Ambiguity Resolution*, Verfahren zur kinematischen Mehrdeutigkeitsbestimmung
KSP	Körperschwerpunkt
LASER	*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, Lichtverstärkung durch induzierte Strahlungsemission
LCD	*Liquid Crystal Display*, Flüssigkristallanzeige
LLBA16	*Laser Light Barrier Array*, 16-Kanal Laser-Lichtschrankensystem
OEM	*Original Equipment Manufacturer*, vom Originalhersteller produziertes Gerät oder Teilkomponente
OTF	*On The Fly*, Verfahren zur kinematischen Mehrdeutigkeitsbestimmung
PDOP	*Position Dilution Of Precision*, geometriebedingte Verschlechterung der Positionierungsgenauigkeit bei GPS
RISC	*Reduced Instruction Set Computing*, Familie von Mikroprozessoren
RTK	*Real Time Kinematic*, GPS-Echtzeitverfahren zur Positionsbestimmung
SRAM	*Static Random Access Memory*, Speichertechnologie
TDOP	*Time Dilution Of Precision*, geometriebedingte Verschlechterung der Zeitgenauigkeit bei GPS
UHF	*Ultra High Frequencies*, Bezeichnung für den Frequenzbereich 300 MHz bis 3 GHz

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen, die mit ihren fachlichen Diskussionen und Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt dem Bundesinstitut für Sportwissenschaft für die Förderung, ohne die das Forschungsprojekt zum GPS-Einsatz im Sport nicht hätte durchgeführt werden können.

Kurzfassung

Die zentimetergenaue satellitengestützte Positionierung hat in den letzten Jahren immer größere Verbreitung in den verschiedensten Bereichen gefunden. In der Literatur wird von ersten Anwendungen auch in der Sportwissenschaft berichtet. Für höchste Genauigkeitsanforderungen werden geodätische GPS-Empfänger und Antennen eingesetzt, deren Anbringung an Athleten aufgrund ihrer Masse und ihres Volumens jedoch problematisch erscheinen.

Ausgehend von den Möglichkeiten, die miniaturisierte Elektronik heute bietet, wurde für die Anwendung im Skispringen ein spezieller GPS-Empfänger entwickelt, der komplett in einen Sprunghelm integriert werden konnte. Damit entstehen nur minimale Beeinträchtigungen im Training – der untersuchte Athlet benutzt anstatt seines eigenen Helms den Messhelm.

Die topographische Lage der Schanzen bewirkt größere Abschattungen der Satellitensignale, sodass GPS-Messungen nicht auf jeder Schanze und zu jeder Tageszeit möglich sind. Die Anzahl gleichzeitig beobachtbarer Satelliten ist vergleichsweise gering. Zentimetergenaue Positionen können zudem nur nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitsfestsetzung erzeugt werden. Gängige GPS-Berechnungsalgorithmen gehen dabei unter anderem von der Voraussetzung ausreichend langer und unterbrechungsfreier Messungen aus, die mit der nutzbaren Zeitspanne von 10 –20 Sekunden für Anlauf, Absprung, Flug und Landung jedoch nicht erfüllt werden kann.

Deshalb wurde ein laserbasiertes Lichtschrankensystem entwickelt, mit dem Passpunktinformationen für den GPS-Helm beim Absprung vom Schanzentisch erzeugt werden können. Diese Informationen fließen in die GPS-Trägerphasenauswertung ein und sorgen für eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Der gesamte Sprung kann so zentimetergenau bestimmt werden.

Im Rahmen von Trainingslehrgängen wurden Messungen gemeinsam mit kinemetrischen und dynamometrischen Untersuchungen durchgeführt und erfolgreich ausgewertet. Anhand dieser Ergebnisse wurde dargelegt, welche vielfältigen Informationen in Geschwindigkeits- und Ortskurven für Anlauf-, Absprung- und Flugphase enthalten sind.

Abstract

Carrier phase based GPS applications with centimeter accuracy have become more popular over the last years, not only in surveying. First investigations are accomplished in sports sciences as well. However, most geodetic GPS equipment is too large and too heavy for attaching it at the athletes body.

Using the potential of miniaturized electronics, a special GPS receiver for ski jumping was developed. The hardware could be integrated completely into a common jumping helmet. Striving to an ideal measurement system with no influence on the athlete activities only little adverse effects remain on the athletes using the GPS-helmet.

The topography of jumping hills results in a more or less shadowing of the GPS satellite signals. Not all jumping hills are applicable for GPS measurements. Measurement campaigns need to be well planned considering satellite constellation issues.

Centimeter accuracy requires successful integer ambiguity fixing. Common algorithms assume uninterrupted signal reception over a sufficient long time. But the 10 –20 seconds for an attempt, take-off, flight and landing are not long enough. Thus a laser light barrier array was developed. It determines position and time of the GPS-helmet during athletes take-off from the ramp. This information enables the ambiguity fixing and enhances accuracy and reliability of the solution, even for short GPS measurement segments.

The system was successfully tested during some training sessions of german ski jumpers. It was shown which informations can be derived from positions and velocities for several phases of a jump.

1 Einleitung

Sportwissenschaft und Biomechanik nutzen für die Leistungsdiagnostik der Athleten Bewegungsanalysesysteme, die überwiegend in Labors oder Turnhallen installiert sind. Jedoch kann bei einer Vielzahl von Feldsportarten, wie z. B. Skifahren, Rudern oder Radfahren in geschlossenen Räumen keine Fortbewegung der Athleten im eigentlichen Sinne stattfinden. Werden die zumeist videobasierten Analysesysteme im Freien betrieben, ist dies mit einigem technischen und personellen Aufwand verbunden. Hinzu kommt, dass immer nur räumlich begrenzte Ausschnitte der Bewegung untersucht werden können.

Auch im Skispringen gehören Untersuchungen der biomechanischen, kinematischen und aerodynamischen Vorgänge seit vielen Jahren zur wissenschaftlichen Praxis. Es finden differenzierte Analysen im Labor, im Windkanal und an der Schanze statt, um die komplexen Einflussfaktoren so zu optimieren, dass die Athleten Weltspitzenleistungen erreichen können. Dabei verhalfen neue technische Möglichkeiten der Sportwissenschaft immer wieder zu Erkenntnissen, die Auswirkungen auf die Gestaltung des Sportgeräts, der Wettkampfbekleidung und des Sprungstils der Athleten hatten.

Bisher werden Flugbahnen und Geschwindigkeiten von Skispringern indirekt bestimmt. Dazu ist die Auswertung von Videobildern notwendig. Hohe Genauigkeiten werden dabei nur erreicht, wenn kalibrierte Kameras eingesetzt werden. Mit Hilfe komplexer numerischer Simulationsverfahren können die Vorgänge beim Skispringen ebenfalls untersucht werden. Ziel ist, das Verständnis der Wechselwirkungen vielfältiger Einflussfaktoren zu verbessern. Die Qualität der Simulationsergebnisse ist jedoch stark abhängig von der Art und Genauigkeit der eingeführten Parameter.

Die Intention dieser Arbeit ist, durch Anwendung moderner satellitengestützter geodätischer Methoden eine direkte Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung beim Skispringen vorzunehmen. Ein Vorteil dieses neuen Ansatzes ist, dass die gesamte räumliche Ausdehnung einer Schanzenanlage abgedeckt werden kann und somit alle Phasen eines Sprungs gemeinsam erfasst werden können. Mit Hilfe gemessener Flugbahnen und Geschwindigkeiten eines Athleten können z. B. Aussagen zur Effektivität während der Anfahrtsphase getroffen, Geschwindigkeitsprofile der Flugphase erstellt oder bestehende numerische Bewegungsmodelle validiert und kalibriert werden.

Aus geodätischer Sicht bewegt sich der zentimetergenaue differentielle GPS-Einsatz beim Skispringen in einem Grenzbereich. Bedingt durch die geographische Lage der Schanzen, viele dieser Bauwerke befinden sich an Nordhängen enger Gebirgstäler, erlangen Einflüsse aufgrund ungünstiger Satellitensichtbarkeit größere Bedeutung. Erschwerend kommt hinzu, dass die Gesamtdauer von Anlauf, Absprung, Flug und Landung beim Skispringen i. d. R. deutlich unter einer halben Minute liegt. Bei der Auswertung solch kurzer kinematischer Messungen treten Zuverlässigkeitsprobleme im Rahmen der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitsfestsetzung auf. Die notwendige Koordinatengenauigkeit von wenigen Zentimetern setzt jedoch eine korrekte Auswertung voraus.

Die vorliegende Arbeit stellt im zweiten Kapitel ausgewählte sportwissenschaftliche Projekte vor, bei denen Positionen und Geschwindigkeiten mit Hilfe von GPS-Messungen bestimmt wurden. Es folgt ein Überblick über wissenschaftliche Untersuchungs- und Messmethoden aus dem Bereich Skispringen.

Das dritte Kapitel gibt Einblick in die Algorithmen zur Mehrdeutigkeitsbestimmung. Dieses Gebiet wird seit ca. 20 Jahren intensiv erforscht, da nicht nur die Wissenschaft, sondern auch die Industrie starkes Interesse an hochgenauen Positionsinformationen hat. Untersucht wurde die Qualität kinematischer GPS-Positionierungen mit kommerziellen Softwareprodukten unter den erschwerten Rahmenbedingungen des Skispringens.

Das vierte Kapitel dokumentiert den gerätetechnischen Entwicklungsprozess eines speziell für den Skisprung optimierten GPS-Helms. Im zweiten Teil des Kapitels wird auf eine technische Neuheit, das Laser-Lichtschrankensystem *LLBA16* eingegangen, welches zur Qualitätssicherung bei der zentimetergenauen kinematischen GPS-Positionierung im Skispringen eingesetzt werden kann. Es schließen sich Untersuchungen zur GPS-Antennenkalibrierung und zum Genauigkeitsnachweis des Gesamtsystems an.

Im fünften Kapitel werden verschiedene mathematische Modelle vorgestellt, aus denen sich der gesamte Auswertealgorithmus des Messverfahrens zusammensetzt. Die berechneten GPS-Koordinaten geben die Position des Kopfes des Athleten an. Für die Integration kinemetrischer Daten oder numerische Simulationen werden jedoch Parameter benötigt, die sich auf den Körperschwerpunkt des Systems Skispringer beziehen. Deshalb wird auf entsprechende Reduktionen eingegangen.

Das sechste Kapitel stellt ausgewählte Ergebnisse praktischer Tests vor und zeigt, dass mit Hilfe von Positionen, Geschwindigkeiten und Zusatzparametern eine Vielzahl von sportwissenschaftlich interessanten Fragestellungen untersucht werden kann. Die Interpretation der Messwerte sowie deren Weiterverwendung in mathematischen Modellen ist jedoch nicht Schwerpunkt dieser Arbeit.

Das siebente Kapitel bewertet die im Rahmen der Arbeit erzielten Ergebnisse. Das entwickelte Messverfahren wird kritisch beurteilt. Es werden Ansatzpunkte zur dessen Optimierung aufgezeigt. Dabei wird auch kurz auf die Möglichkeiten und Grenzen der GPS-gestützten Inertialmesstechnik eingegangen.

2 Entwicklung der sportwissenschaftlichen Forschung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet des Skispringens. Vorab muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die publizierten Ergebnisse zum Teil von unterschiedlicher Qualität sind. Insbesondere werden die bisher eingesetzten Untersuchungsmethoden näher vorgestellt und in Bezug auf ihr Leistungsvermögen eingeordnet. Dank der weiter fortschreitenden technischen Entwicklung kommen aber auch gänzlich neue Messverfahren im Bereich der Sportwissenschaft zur Anwendung. Deshalb soll vorab auf einige Forschungsprojekte auch außerhalb des Skispringens verwiesen werden, die satellitengestützte Verfahren zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung zur Beantwortung sportwissenschaftlicher Fragestellungen nutzen.

2.1 GPS-Einsatz in verschiedenen Sportarten

Generell kann die Nutzung von GPS in verschiedene Klassen unterteilt werden. Dabei ist die erzielbare Genauigkeit abhängig vom eingesetzten Messverfahren und von den Leistungsmerkmalen des Empfängers. Für einfache preiswerte Handgeräte werden Positionierungsgenauigkeiten im Absolutmodus von 10 – 20 m (CEP) angegeben. Diese Empfänger sind primär für den breiten Massenmarkt entwickelt worden. Dabei wird nur das L1-Signal der Satelliten empfangen und ausgewertet. Solche Geräte wurden bereits im Sport eingesetzt, z. B. zur Dokumentation von physiologischen Parametern von Läufern in Abhängigkeit von der Laufstrecke [Miller 2001]. Diese Genauigkeitsklasse steht jedoch nicht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit.

In der zweiten Hälfte der 90er Jahre war die gerätetechnische Entwicklung so weit fortgeschritten, dass relativ kompakte geodätische Zweifrequenz-GPS-Empfänger am Markt verfügbar wurden. Mit Hilfe differentieller Trägerphasenlösungen sind Positionierungsgenauigkeiten im Zentimeterbereich möglich. Daraufhin haben verschiedene Forschergruppen die Tauglichkeit dieser Geräte und Verfahren im Bereich der Sportwissenschaft untersucht.

Lichtenegger u. a. [1997] setzten *Ashtech Z-12* Empfänger ein, um alpine Rennstrecken in Österreich für eine Datenbank aufzumessen. Dabei wurde das mobile Gerät in einem Rucksack verstaut, den eine Testperson auf Skiern die Piste hinab ins Tal beförderte. Die Antenne ragte in Kopfhöhe aus dem Rucksack heraus. Ziel war es, das Streckenprofil zu vermessen. Um die Positionsgenauigkeit auf ca. 1 m zu erhöhen, wurde ein Differentialverfahren gewählt. Ein zweiter Empfänger als Referenzstation lieferte entsprechende Korrekturdaten. Als Ergebnis entstand eine Spline-geglättete Trajektorie des Abfahrtshangs. Die Autoren weisen darauf hin, dass die GPS-Empfangsbedingungen nicht auf der gesamten Strecke optimal sind. Abschattungen durch Berge oder Bäume verhinderten teilweise den Signalempfang. So besitzen andere Vermessungstechniken, wie z. B. Luftbildauswertung oder Tachymetrie immer noch einen großen Stellenwert bei diesen Anwendungen.

Ladetto u. a. [2000] nutzten differentielle GPS-Messungen in Kombination mit dreiachsigen Beschleunigungssensoren zur Untersuchung von Fahrspuren und Geschwindigkeiten alpiner Skiläufer. Aus Positionslösungen mit bis zu 20 Hz (GPS) sind höher aufgelöste Informationen über die aktuelle Geschwindigkeitsentwicklung des Rennläufers möglich. Mit herkömmlicher Lichtschrankentechnik kann immer nur eine mittlere Geschwindigkeit über einen festgelegten Fahrabschnitt ermittelt werden. Die relativ großen und schweren GPS-Antennen (*Javad Legant* bzw. *Leica System 500*) wurden auf Helmen montiert, können aber durchaus als eine Behinderung bei der Ausübung der sportlichen Aktivitäten angesehen werden.

Die Autoren nutzten horizontale und vertikale Beschleunigungsprofile, um charakteristische Merkmale verschiedener Läufer beim Passieren der Tore zu erkennen. Die Zuordnung der Beschleunigungsmesswerte zur Hanggeometrie erfolgte über ein Korrelationsverfahren. Bei der Tordurchfahrt entstehen signifikante Beschleunigungsmuster, die ähnlich auch in den GPS-Daten nachzuweisen sind.

Eine Untersuchung zur GPS-gestützten Vermessung des menschlichen Gangs wurde von Terrier u. a. [2000] veröffentlicht. Mit Hilfe zentimetergenauer DGPS-Phasenlösungen wurde die Bewegung des Rumpfes beim Gehen mit 5 Hz Datenrate aufgenommen. Aus dem vertikalen Ortsveränderungsmuster wurden einzelne Schritte detektiert und analysiert. Es wurden Parameter, wie z. B. typische Schrittlängen und Schrittgeschwindigkeiten abgeleitet. Von Interesse sind dabei die inter- und intraindividuellen Unterschiede, speziell auch bei wechselnden äußeren Bedingungen. Als Zusatzsensor wurde ein Beschleunigungsmesser am Rumpf der Testpersonen eingesetzt. Mit diesen Messgrößen ist unter Beachtung anthropometrischer Kenngrößen der Testperson eine Abschätzung der zur Bewegung benötigten Energiemenge möglich. Als GPS-Empfänger wurden *Leica System 500* Geräte verwendet.

Auch im Bereich Rudern wurde der Einsatz von GPS zur Bestimmung der Fahrlinie, der Bootsgeschwindigkeit und Beschleunigung untersucht. Zhang u. a. [2003] verglichen die Genauigkeit von preiswerten Einfrequenzempfängern mit der von geodätischen Zweifrequenzgeräten mit dem Ziel, ein möglichst preiswertes und wenig komplexes Gerät zur Trainingssteuerung zu entwickeln. Die Genauigkeiten der Geschwindigkeit wurden als nahezu gleichwertig eingeschätzt, wenn diese aus Phasen- oder Dopplermessungen berechnet werden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass auch preiswerte L1-Geräte eingesetzt werden können.

Da die Genauigkeit der Absolutpositionierung im ein- bis zweistelligen Meterbereich liegt, kann eine hochgenaue Geschwindigkeitsinformation jedoch nur sehr grob georeferenziert werden. Deshalb erscheint der Einsatz von Einfrequenzgeräten nur dann sinnvoll, wenn Sofortinformationen für die Athleten bereitgestellt werden sollen oder jeglicher Raumbezug untergeordnet ist, wie z. B. bei Geschwindigkeitsvergleichen aufeinanderfolgender Schlagzyklen.

Die von einigen Autoren eingesetzten Beschleunigungsmesser können theoretisch auch dazu genutzt werden, die Zeiten zu überbrücken, in denen GPS aufgrund von Abschattungen keine Positions- und Geschwindigkeitsinformationen liefern kann. Jedoch sind hierfür deutlich komplexere mathematische Ansätze erforderlich. Solche Inertialsysteme, die zudem auch mit Kreiseln ausgestattet sein müssen, nutzen GPS-Positionen als Stützung. Hierfür wären GPS-Datenraten von ca. 1 Hz ausreichend. Die hohe zeitliche Auflösung wird durch die Inertialsensorik selbst realisiert [Wagner 2003]. Speziell beim Rudern können mit solchen Sensoren auch die rotatorischen Freiheitsgrade des Bootes erfasst werden. Um diese Informationen mit GPS zu erhalten, wären mindestens drei günstig über das Boot verteilte Empfangssysteme notwendig.

Untersuchungen im Auftrag des Bundesinstituts für Sportwissenschaft

Angeregt durch die Veröffentlichung von Lichtenegger u. a. [1997] erfolgten am Geodätischen Institut der TU Dresden im Jahr 1999 die ersten eigenen Untersuchungen[1] zum Einsatz von GPS im Bereich der Sportwissenschaft. In enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Sportmedizin der Ruhr-Universität Bochum wurden Testmessungen im Bereich Ski-Alpin durchgeführt. Es wurde untersucht, ob GPS als Messverfahren überhaupt geeignet ist, neben der quasistatischen Gelände- und Torerfassung auch Fahrspuren und Geschwindigkeitsprofile von alpinen Skiläufern zu dokumentieren. Dabei wurde die am Geodätischen Institut vorhandene *Trimble 4700*-Ausrüstung in Verbindung mit einer etwas leichteren und kleineren Zweifrequenzantenne eingesetzt. Die erfolgreichen Experimente motivierten dazu, weitere Testmessungen auch in den Bereichen Skisprung und Rudern durchzuführen [Blumenbach und Henke 2001].

Bei diesen Untersuchungen zeigten sich immer wieder die Stärken und Schwächen der industriell gefertigten Geräte für die Vermessungspraxis. Bedingt durch die Robustheit, die solche Ausrüstung für den Außeneinsatz haben muss, ergaben sich Schwierigkeiten. Die Sensorik konnte nicht optimal an die sportwissenschaftlich interessanten Positionen, z. B. den Kopf des Athleten oder den Ski angebracht werden. Masse und Volumen waren zu groß. Für künftige GPS-Einsätze auf diesem Gebiet erschien ein Empfänger mit geringst möglichem Gewicht und zugleich maximaler Abtastrate unbedingt erforderlich.

Da es zu diesem Zeitpunkt noch keine GPS-basierten Untersuchungen im Skispringen gab, wurden die weiteren Anstrengungen im Forschungsprojekt in diese Richtung gelenkt. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über Forschungsergebnisse aus dem Bereich Skispringen und zeigen auf, wo das Potenzial des neuen Messverfahrens liegt.

2.2 Aspekte der Forschung im Skispringen

Die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet des Skispringens können grob in drei Bereiche unterteilt werden [Schwameder und Müller 2001]. An der Schanze finden deskriptive Analysen basierend auf der genauen Beobachtung des Handlungs- und Bewegungsablaufs in Training und Wettkampf statt. Durch Vergleiche von extrahierten Merkmalen, wie z. B. der Körperhaltung beim Absprung mit den Merkmalen der besten Springer werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgestellt. Ziel der Untersuchungen ist es, den Leistungsstand der Weltspitze zu erfassen und individuelle Reserven der untersuchten Athleten aufzuzeigen [Mahnke und Mroß 1995]. Dazu werden individuelle Technikleitbilder als Vorgabe für die Athleten erarbeitet.

Ein zweiter Bereich konzentriert sich auf Untersuchungen im Labor. Hier werden u. a. simulierte Sprünge zur Optimierung der Technik durchgeführt. Dabei wird von einer hohen Affinität zwischen Simulationsübung und Wettkampf ausgegangen [Neumaier u. a. 1997]. Die Leistungsdiagnostik erfolgt mit Hilfe moderner Bewegungsanalysesysteme (vgl. Kap. 2.3.1).

Ein dritter, gänzlich anderer Ansatz besteht darin, mit numerischen Modellen am Computer die Bewegung des Athleten aufgrund wirkender innerer und äußerer Kräfte zu simulieren [Virmavirta und Komi 2001], [Schmölzer und Müller 2002], [Marasović 2003] (vgl. Kap. 2.4). Dabei wird ein ganz unterschiedlich hoher Aufwand betrieben, um die leistungsbestimmenden Einflussfaktoren zu ermitteln und im Modell gewichten zu können. In erster Näherung können Punktmasse-Modelle aus der Mechanik genutzt werden. Jedoch ergeben sich hier erhebliche Abweichungen, da in der Realität große, verteilte Luftkräfte wirken. Deshalb beziehen komplexere Modelle die Aerodynamik des Systems Skispringer in die Simulationen ein. Der Athlet ist dabei ein bewegliches Mehrkörpermodell [Hubbard u. a. 1989]. Aus Windkanaluntersuchungen stehen Erkenntnisse über das Strömungsverhalten und die dabei auftretenden Luftkräfte zur Verfügung [Cutter 1994], [Mroß und Mahnke 1994].

[1] Dieses Projekt wurde mit Forschungsmitteln des Bundesinstituts für Sportwissenschaft unter dem Geschäftszeichen VF08/06/01/2004 gefördert.

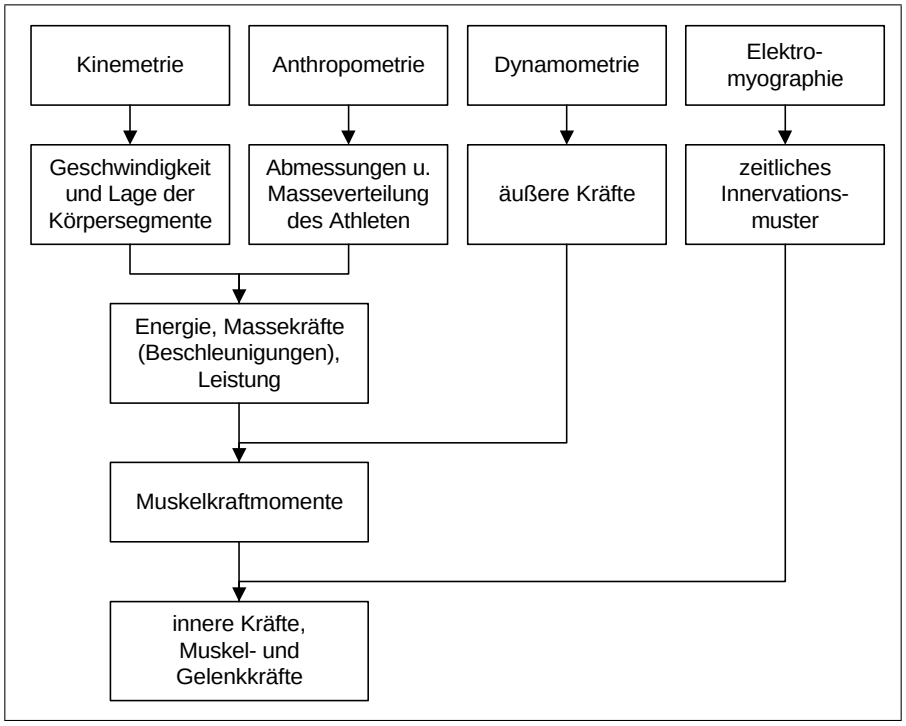

Abb. 2-1: *Klassifikation der biomechanischen Messtechnik*

Liest man z. B. in [Komi u. a. 1974] noch von gelegentlichen wissenschaftlichen Untersuchungen und einer Verbesserung der Sprungtechnik getragen von der Kreativität der Springer und Trainer, so hat sich dies heute grundlegend geändert. Das Leistungsniveau der Weltspitze ist extrem hoch. Es basiert nicht mehr primär auf dem Einfallsreichtum der Athleten und Trainer. Vielmehr ist eine breite wissenschaftliche Begleitung schon im Nachwuchsbereich Grundlage für spätere Erfolge. Nicht nur die Technik des Springens, sondern auch die Ausrüstung der Athleten und die Schanzenanlagen werden heute mit modernsten Methoden der Wissenschaft optimiert. Dabei kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz, die in den folgenden Abschnitten bzgl. ihrer zu erwartenden Genauigkeiten und ihrer Bedeutung für das Skispringen näher betrachtet werden.

2.3 Messverfahren der Biomechanik

Ziel der biomechanischen Diagnostik in der Sportwissenschaft ist es unter anderem, die motorischen Bewegungen und die dafür notwendigen mechanischen Bedingungen zu analysieren. Dabei werden unterschiedliche Messverfahren eingesetzt, die nach der Art der gemessenen Größen entsprechend Abb. 2-1 eingeteilt werden können.

Kinemetrische Methoden liefern geometrische Informationen über die Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung von Körpern. Werden diese Größen mit Abmessungen und Masseverteilungen des Athleten in Beziehung gesetzt, können Aussagen über Beschleunigungskräfte, die dazu notwendige Energie und die dabei verrichtete Arbeit getroffen werden. Werden durch dynamometrische Verfahren äußere Krafteinwirkungen auf den Athlet erfasst, lassen sich Muskelkraftmomente berechnen. Die Elektromyographie liefert Informationen über den zeitlichen Verlauf der Muskelkontraktion. Damit gelingt es, Muskel- und Gelenkkräfte zu berechnen, die zum Einen als Ausgangsgrößen in den Optimierungsprozess einer Sportart einfließen. Andererseits können daraus Maximalbelastungen und mögliche Gesundheitsrisiken für die ausgeübte Sportart abgeleitet werden.

2.3.1 Kinemetrische Verfahren

Typische dreidimensionale Bewegungsanalysesysteme wie z. B. *SIMI °Motion*, *WINanalyze* oder *Peak Motus* nutzen photogrammetrische Verfahren, um die Bewegung von Athleten zu messen. Zur Bildaufnahme werden dabei heute fast ausschließlich Videokameras eingesetzt, deren Bilder digital weiterverarbeitet werden. Durch den Digitalisierungsvorgang[2] werden die Bildinformationen in Grauwerte eines jeden Farbkanals umgewandelt.

Diese bildbasierten Verfahren bieten den Vorteil, dass sie berührungslos arbeiten, damit rückwirkungsfrei auf den Athleten sind und somit im Training und auch im Wettkampf eingesetzt werden können. Nachteilig wirken sich die

[2] Die Analog-Digitalwandlung erfolgt entweder in der Kamera oder in einer sog. *Framegrabber*-Karte im PC.

Abb. 2-2: *Ausschnitt aus einem Halbbild des Videoanalysesystems des Instituts für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig. Aus solchen Bildern werden durch Digitalisierung Körperhaltungswinkel bestimmt.*

z.T. sehr zeitaufwändigen Kalibrier- und Auswerteprozeduren aus. Die gesuchten 2D- oder 3D-Koordinaten des beobachteten Objekts müssen indirekt aus einem oder mehreren Bildern berechnet werden.

Die grundlegenden Messgrößen der Kinemetrie sind Bildkoordinaten und Zeiten. Zur Analyse von Bewegungen werden daraus Körpersegmentwinkel abgeleitet. Durch zeitliche Differentiation der Messwerte können Körpersegmentgeschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden, wobei letztgenannte aufgrund der zweimaligen numerischen Differentiation nicht ganz unumstritten sind [Baumann 1990]. Die Zeitkomponente wird dabei durch das Belichtungsintervall einer Bildsequenz vorgegeben. Für eine dreidimensionale Objektpunktbestimmung sind immer mehrere synchronisierte Kameras mit verschiedenen Blickwinkeln notwendig.

Aufgabe des Auswerters ist es, die Bildkoordinaten der zu untersuchenden Körpersegmente in einer Sequenz auszuwählen. Der gewählte Bildmaßstab bestimmt dabei die Größe der auftretenden Digitalisierungsabweichung. Die Wahl des sichtbaren Bildbereichs wird durch die geforderte Detailtreue (hohe Digitalisierungsgenauigkeit, kleiner Bildausschnitt) und dem Wunsch nach möglichst großer räumlicher Abdeckung mit einer Kameraeinstellung (geringe Digitalisierungsgenauigkeit) beeinflusst.

Am Messobjekt angebrachte eindeutig identifizierbare Marker können den Digitalisierungsvorgang erleichtern. Moderne Bildverarbeitungsverfahren können solche Marker automatisch erkennen und berechnen deren Koordinaten. Im Skispringen führt das automatisierte Verfahren leider nicht zum gewünschten Erfolg, da die Athleten mit nicht immer eng anliegenden Anzügen springen. Werden die Gelenkpunkte am Anzug markiert, verschiebt sich die Lage des Anzugs gegenüber dem Körper aufgrund des Windeinflusses. In der Praxis werden die Gelenkpunkte deshalb manuell bestimmt, jedoch ist mit einem großen Einfluss des persönlichen Digitalisierungsfehlers zu rechnen. Wird beim Skispringen eine Flugbewegung quer zur Kameraachse analysiert, ergeben sich zusätzliche Parallaxenfehler aufgrund der zentralperspektivischen Abbildung des Objektraumes.

Verfahrensgenauigkeit

Mit einer Überschlagsrechnung soll die zu erwartende Genauigkeit der Bildauswertung veranschaulicht werden. Gegeben sei ein Kamerabild (Abb. 2-2) mit der Standardauflösung von 768x576 Bildpunkten. Die Halbbild-Problematik bei Videoaufzeichnungen soll dabei vorerst nicht berücksichtigt werden. Der Bildausschnitt in der Objektebene sei 10 m breit. Damit hat ein Bildpunkt in dieser Ebene eine Kantenlänge von 1,3 cm. Die Gelenkpunkte eines 0,5 m langen Körpersegments, z. B. eines Unterschenkels, liegen somit rund 38 Pixel voneinander entfernt. Werden beide Endpunkte digitalisiert, ergibt sich im Beispiel eine theoretische Standardabweichung der Segmentlänge von $\sqrt{2}\cdot 1{,}3$ cm = 1,8 cm, die gut mit dem von Arndt u. a. [1995] angegebenen relativen Messfehler von 4 % der Segmentlänge übereinstimmt. Drenk und Hildebrand [1999] geben sogar Größenordnungen von 5 cm an.

Um nun die Körperhaltung zu beschreiben, wird der Winkel zwischen einer Referenzrichtung und dem Körpersegment betrachtet. Wählt der Auswerter den Endpunkt des Segments um genau ein Pixel quer zum Segment versetzt (Maximalabweichung), entsteht eine Winkeldifferenz von rund 2 Grad. Yeadon [1989] gibt die Standardabweichung der berechneten Körperschwerpunktslage mit 3 cm und die Standardabweichung der abgeleiteten Orientierungswinkel mit 1 Grad an. Dabei wurden Filmkameras mit Bildausschnitten bis maximal 14 m eingesetzt.

Videobilder werden meist mit 50 Hz Bildwiederholfrequenz in Form von Halbbildern erzeugt. Durch die schnelle Bewegung des Athleten sind jedoch erstes und zweites Halbbild deutlich gegeneinander versetzt. Die Halbbilder werden i. d. R. einzeln betrachtet, wobei die fehlenden Videozeilen z. B. durch Interpolation oder Zeilenverdopplung erzeugt werden müssen. In Vertikalrichtung entsteht somit ein schlechteres Auflösungsvermögen. Ein erfahrener Auswerter wird dies jedoch beim Digitalisierungsvorgang berücksichtigen.

Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung bei der Digitalisierung

Zur Steigerung der Genauigkeit werden bei dreidimensionalen Bewegungsanalysen Verfahren mit Berücksichtigung der Anthropometrie des Athleten gewählt [Drenk und Hildebrand 1999]. Während des Digitalisierungsvorgangs wird parallel dazu ein numerisches Skelettmodell berechnet. Anstelle der freien Wahl der zu digitalisierenden Bildpunkte werden nur noch die Punkte zugelassen, die sich durch Rotation und Translation des Skelettmodells und seiner Teilkörper ergeben können. Somit gehen die Körpersegmentlängen und Gelenkfreiheitsgrade als Bedingungen in die Ausgleichung ein. Für die zweidimensionale Bildauswertung, wie sie derzeit beim Skispringen eingesetzt wird, ergeben sich jedoch mehrdeutige Lösungen aufgrund der projektiven Verzerrung der Segmente beim Verlassen der Bildebene. Das Verfahren ist also nur unter Einführung weiterer Kameraperspektiven oder anderer Zwangsbedingungen einsetzbar.

Eine Maßnahme zur Erhöhung der Digitalisierungsgenauigkeit ist die Verwendung von sog. Subpixelalgorithmen in Verbindung mit Bildmustern [Frischholz und Spinnler 1993]. Die Bildauflösung wird durch *resampling* rechentechnisch erhöht. Das gesuchte Bildmuster (Marker) wird als Überlagerung solange auf dem Bild verschoben, bis sich eine vorab definierte Zielfunktion ihrem Minimum nähert. Der Verschiebungsbetrag, der meist über lineare oder kubische B-Spline-Interpolationen berechnet wird, liegt dann im Subpixelbereich. Als Zielfunktionen werden z. B. Differenzfunktionen zwischen Bild- und Passpunkten genutzt. Die Genauigkeit der Musterpositionierung ist sehr hoch und liegt im Bereich von 10 % der Pixelgröße [Frischholz und Spinnler 1993]. Bei der Digitalisierung von Skispringern führt das schon angesprochene Problem der windbedingten Verschiebung der Gelenkpunktmarkierung auf den Sprunganzügen zu deutlich größeren Abweichungen.

2.3.2 Anthropometrie und anthropometrische Biomechanik

Anthropometrie ist die Lehre von der Vermessung des menschlichen Körpers. Besonders für biomechanische Untersuchungen ist es wichtig, nicht nur die Körpersegmentlängen zu kennen. Vielmehr interessiert auch die Masseverteilung im Körper, damit Beschleunigungskräfte, innere Kräfte und Trägheitsmomente bei verschiedenen Körperhaltungen berechnet werden können. Die biomechanische Anthropometrie umfasst Verfahren zur Bestimmung

- von Segmentlängen und Umfängen,
- der geometrischen Masseverteilung, der Lage des Körperschwerpunkts, der Massenträgheitsmomente von Körpersegmenten,
- der inneren Geometrie des Bewegungsapparats (Lage der Gelenkachsen, Hebelarme der Muskulatur, Muskellängen),
- sowie der Festigkeitseigenschaften des Bewegungsapparates (Elastizität, Verformung und Bruchfestigkeit).

Das Grundproblem bei der Bestimmung von Teilkörpermassen ist, dass es sich um lebende Organismen handelt. In den letzten rund einhundert Jahren sind zwar viele Leichen seziert und untersucht worden, um wichtige Parameter, wie z. B. Teilkörpermassen und Trägheitsmomente bestimmen zu können. Jedoch sind diese Erkenntnisse nur bedingt auf den lebenden Organismus übertragbar, da sich die Zusammensetzung von totem und lebenden Gewebe z.T. erheblich unterscheidet.

Bedeutende Arbeiten auf dem Gebiet der Anthropometrie des menschlichen Körpers sind die von W. M. Saziorski. Mit Hilfe seiner Radioisotop-Methode wurden Massen und Masseverteilungen am lebenden Objekt bestimmt [Saziorski u. a. 1984]. Die Untersuchungen sind deshalb in der Biomechanik des Sports so wichtig, weil sich der untersuchte Personenkreis zum Großteil aus Sportstudenten zusammensetzte und damit hinreichend repräsentativ für den Leistungssport ist. Auf den Formelapparat zur Körperschwerpunktberechnung wird in Abschnitt 5.3 noch genauer eingegangen.

2.3.3 Dynamometrie

Die Dynamometrie ist eine Methodik auf der Basis von Kraftmessungen. Bestimmt werden Betrag und zeitlicher Verlauf äußerer Kraftwirkungen auf eine geeignete Oberfläche, die meist eine ebene Platte ist. Zwischen dieser Platte und einem stabilen Widerlager befinden sich die eigentlichen Sensoren. Durch die Krafteinwirkung werden die Sensoren minimal elastisch verformt. Der Verformungsbetrag wird dabei über integrierte Piezoelemente oder Dehnungsmessstreifen in ein proportionales elektrisches Signal umgewandelt. Über einen Messverstärker gelangen die Signale in die Auswerteeinheit. Typische Auflösungen der Geräte liegt im Bereich von 0,2 – 1 N mit einer Linearität von $\pm 0{,}5$ % des Maximalwerts [Kistler 2004]. Die Wiederholgenauigkeit dynamometrischer Messungen in der Biomechanik ist hauptsächlich geprägt durch den Einfluss des Athleten selbst. Der Sensor liefert reproduzierbare Messungen in der Größenordnung von 1 – 3 % des Messwerts. Um den zeitlichen Verlauf einer Krafteinwirkung zu bestimmen, werden Einzelmessungen mit Abtastfrequenzen von einigen hundert bis wenigen tausend Hertz durchgeführt.

An Sprungschanzen werden Kraftmessplattformen typischerweise auf den letzten 8 – 15 Metern vor der Schanzentischkante eingesetzt. Damit können die resultierenden Kräfte beim Absprung erfasst werden. Aus technischer Sicht

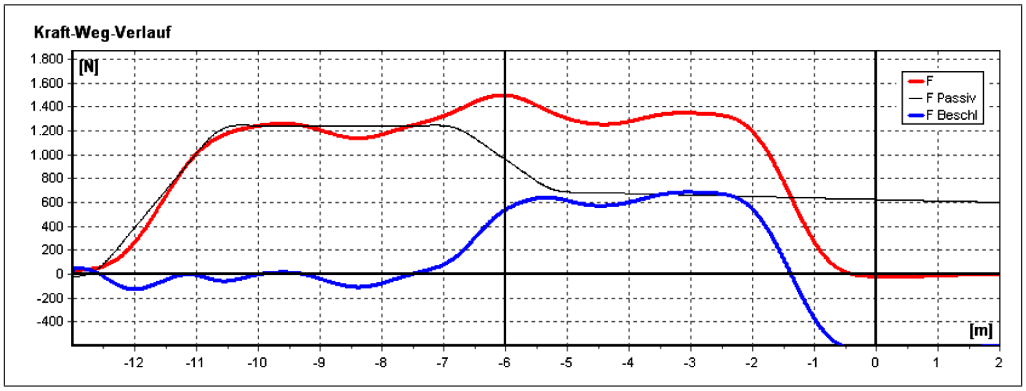

Abb. 2-3: *Dynamometrisch gemessener Kraftverlauf beim Absprung (Quelle: IAT Leipzig). Von der gemessenen Kraft F werden die passiven Komponenten Gewichtskraft und Zentrifugalkraft abgezogen. Im Absprungbereich (ab -6 m) vermindern sich die Passivkräfte, da die sich öffnende Körperhaltung einen verstärkten Auftrieb bewirkt.*

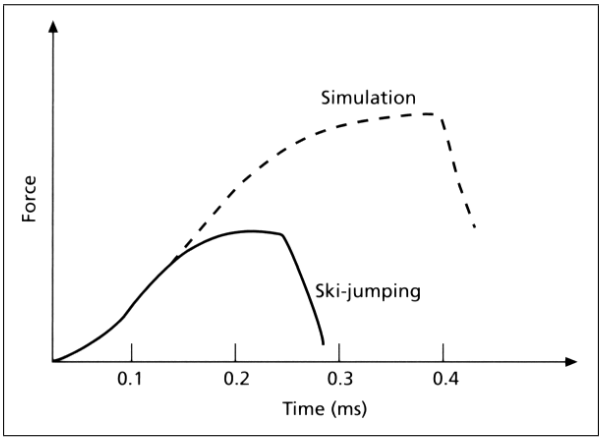

Abb. 2-4: *Schematische Kraft-Zeit-Verläufe von Labor- und Schanzenabsprüngen. Die Zeit ist ein limitierender Faktor bei realen Sprüngen. (Quelle: [Komi 1996]; Anm.: Die Einheit der Abszisse ist vermutlich Sekunde, nicht Millisekunde.)*

kommt der mechanischen Entkopplung der meist 1 Meter langen und spurbreiten Einzelplattformen eine entscheidende Bedeutung zu. Es muss wirkungsvoll verhindert werden, dass die Kraftwirkungen auf eine Einzelplattform durch Schwingungsübertragung im Unterbau auf die Nachbarsensoren gelangen. Auch die Eigenschwingungen (typ. Resonanzfrequenz einige 100 Hz) einer Plattform selbst müssen effektiv gedämpft werden.

Abb. 2-3 zeigt den typischen Kraftverlauf beim Absprung eines Skispringers. Bei mittleren Anfahrtsgeschwindigkeiten von 25 m/s steht für die Ausführung des Absprungs eine Zeit von rund 0,25 s zur Verfügung. Nur innerhalb dieser kurzen Zeit kann die Absprungkraft aufgebaut werden. Deshalb kommt der Sprungtechnik, der Schnellkraft sowie dem koordinativen Leistungsvermögen des Athleten eine besondere Bedeutung zu. Würde die Absprungphase längere Zeit in Anspruch nehmen, könnten noch deutlich höhere Kräfte erzeugt werden. Abbildung Abb. 2-4 zeigt den Unterschied der vertikalen Absprungkräfte zwischen einem im Labor durchgeführten und einem realen Skisprung.

Die bei der Aufstehbewegung entwickelten Kräfte eines realen Sprungs sind also deutlich geringer, da nach dem Durchfahren des Schanzentischs die Unterstützungsfläche fehlt. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Kraftentwicklung schnell und zeitlich präzise erfolgt. Durch die hohe Anfahrtsgeschwindigkeit ist die zur Verfügung stehende Absprungzeit der limitierende Faktor.

Da die Messwerte die Summe aller wirkenden Kräfte senkrecht zur Unterstützungsfläche (Bodenreaktionskräfte) wiedergeben, müssen bei der Auswertung entsprechende Reduktionen vorgenommen werden. Allgemein setzt sich die gemessene Kraft aus der Normalkraft (s.u.), der zusätzlichen Zentrifugalkraft (im Radiusbereich) und der Absprungkraft zusammen. Während der Aufstehbewegung entstehen außerdem große Luftkräfte, deren Komponenten in Normalenrichtung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Mit der vorab bestimmten Masse des Athleten kann die Gewichtskraft bestimmt werden. Über die Neigung der Unterstützungsfläche lässt sich nun die Normalkraft berechnen.

Die im Radiusbereich wirkende Zentrifugalkraft ist geschwindigkeitsabhängig. Deshalb befinden sich im Anlaufbereich Lichtschranken, mit deren Hilfe mittlere Geschwindigkeiten des anfahrenden Athleten ermittelt werden. Alternativ dazu können auch die GPS-Messungen benutzt werden, vgl. Kap. 5.6.

Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass alle Athleten sowohl im Training als auch im Wettkampf gemessen werden können. Somit sind Vergleichsstudien zwischen Weltklassespringern und Nachwuchsathleten möglich. Der zeitliche Kraftverlauf gibt Auskunft über die koordinative Leistung eines Athleten. Aus Betrag und Anstiegsverhalten der Kraftverläufe können Rückschlüsse auf die Sprungtechnik und den aktuellen Leistungsstand bzgl. der Schnellkraft des Athleten gezogen werden. In der Praxis werden die dynamometrischen Messungen oft mit kinematischen Methoden kombiniert: Aus der Körperhaltung des Athleten können Schwerpunktkoordinaten abgeleitet werden, die in Verbindung mit den Kraftmessungen Aussagen zum Beschleunigungsweg und zum Drehmoment/-impuls des Athleten ermöglichen [Virmavirta und Komi 2001].

Mobile dynamometrische Systeme

Eine weitere Form der Kraftmessung wurde von Neumaier u. a. [1997] durchgeführt. Dabei kamen speziell angefertigte Kraftmessbindungen auf den Skiern zum Einsatz, die auch schon für Untersuchungen im alpinen Skilauf eingesetzt wurden. Damit konnte der gesamte Sprung untersucht werden, wobei schwerpunktmäßig die Anfahrts- und Absprungphase im Mittelpunkt stand. Neben den bereits genannten Merkmalen erlaubt die spezielle Messungsanordnung Aussagen zur Symmetrie der Kräfteverteilung in den Beinen, der Vor- oder Rücklage des Athleten sowie der Kantenbelastung von Innen- und Außenseite der Skier.

Schwameder und Müller [1995] nutzten für ihre Untersuchungen Drucksensoren in Form von Einlegesohlen (*Micro-EMED* System). Die Signale der 170 Sensoren jeder Sohle wurden während des Sprungs aufgezeichnet. Für die Auswertung wurde eine 55x40 Matrix über die Sohlen gelegt. Der Kraftwert jedes Feldes entstand durch Interpolation der Messwerte. Jedoch wird von relativ hohen systematischen Abweichungen und geringen Abtastfrequenzen berichtet. Untersucht wurden damit die Druckverhältnisse im Anlauf- und Absprungbereich. Neben der Maximalkraft wurden auch Drehmomente und Drehimpuls bestimmt. Dank der räumlichen Verteilung der Einzelsensoren konnte die Belastung der Fußinnen- und Außenseite bei der Einnahme der V-Stellung und bei der Landung untersucht werden.

2.3.4 Elektromyographie

In diesem Abschnitt soll das Verfahren der Elektromyographie (EMG) nur kurz umrissen werden, da es in keinem unmittelbaren Zusammenhang zu dieser Arbeit steht. Diese Art von Untersuchungen werden seltener durchgeführt, da eine zeitaufwändige Präparation der Athleten notwendig ist. Hinzu kommen die Rückwirkungen der Geräte und Kabel auf den Athleten, da die Messtechnik am Körper getragen werden muss.

In den Muskelfasern sind kleine elektrische Spannungen im unteren Millivolt-Bereich, sog. Muskelaktionspotentiale (MAP) zu beobachten. Diese Potentiale bauen sich durch willkürliche, unwillkürliche oder von außen stimulierte Kontraktionen der Muskelfasern auf. Befindet sich ein Muskel entspannt im Ruhezustand, verschwinden die MAP.

Das EMG-Messverfahren basiert darauf, die Muskelaktionspotentiale mit Hautoberflächensensoren oder Nadelelektroden zu erfassen, zu verstärken und geeignet aufzuzeichnen. In den Daten lassen sich charakteristische Muster erkennen, die mit der Muskelaktivität korrelieren. Das Aktivitätsmuster bei maximaler Muskelkontraktion zeigt mit zunehmender Innervationsstärke einen Anstieg in der Anzahl und der Frequenz der elektrischen Entladungen. Bei maximaler Innervation entsteht ein sog. Interferenzmuster. Aus den verschiedenen Mustern lassen sich Rückschlüsse über den Zustand eines Muskels ziehen. Bei Bewegungsabläufen, wie z. B. dem Absprung vom Schanzentisch, kann der zeitliche Verlauf der Muskelkontraktion analysiert werden. In Verbindung mit äußeren Kräften, z. B. aus dynamometrischen Messungen, sind somit Aussagen über Muskel- und Gelenkkräfte möglich.

Auch dieses Messverfahren profitiert stark vom technischen Fortschritt der letzten Jahre. Heutige EMG-Geräte sind mit kleinen Abmessungen erhältlich und können deshalb für Untersuchungen im Bereich Skispringen auch auf der Schanze eingesetzt werden. Spezielle Untersuchungen in dieser Richtung wurden von Virmavirta, Perttunen und Komi durchgeführt. Dabei kamen kombinierte Drucksensor- und EMG-Sohlen im Sprungschuh zum Einsatz. Untersucht wurden die Unterschiede in den Muskelaktivitäten und der Druckverteilung unter der Fußsohle beim Absprung von unterschiedlich großen Sprungschanzen [Virmavirta u. a. 2001].

2.4 Numerische Skisprung-Simulationen

Der dritte bereits angesprochene Bereich der Skisprung-Forschung befasst sich mit der mathematischen Modellierung der komplexen Vorgänge von Anlauf, Absprung und Flug. In den folgenden Abschnitten wird auf die Grundlagen der Modellierung, auf verschiedene Entwicklungsstufen veröffentlichter Modelle sowie auf die Möglichkeiten zur Gewinnung der notwendigen Randparametern eingegangen.

2.4.1 Entwicklungsstufen numerischer Modelle

Mit Hilfe numerischer Modelle wurden und werden eine Reihe spezieller biomechanischer und sportwissenschaftlicher Fragen untersucht. Dabei beschränken sich die Autoren beim Skispringen aufgrund der Komplexität solcher Simulationen meist auf einzelne Sprungphasen, z. B. auf die Übergangs- und Flugphase. Die Tendenz in der Modellierung des Skisprungs geht von einfachen Punktmassemodellen über 2D-Modelle mit einigen Freiheitsgraden bis hin zu aufwendigen 3D-Modellen mit Berücksichtigung von Drehmomenten und Gelenkkräften.

Erste analytische Modelle für die Flugphase eines Sprungs wurden bereits 1926 von Straumann aufgestellt [Straumann 1926]. Remizov [1984] untersuchte das Flugverhalten von Skispringern mit dem Ziel, eine optimale Flughaltung zu finden. Für die Simulation wurde die Flughaltung mit dem Anstellwinkel des Körpers gleichgesetzt. Der Skianstellwinkel blieb unverändert. Windkanaluntersuchungen lieferten Werte für Auftrieb und Widerstand. Remizov konnte nachweisen, dass die Flugweite maximal wird, wenn im Verlauf des Fluges der Körperanstellwinkel nach einer konvexen Funktion vergrößert wird. Die Ergebnisse sind aufgrund des sehr vereinfachten Modellansatzes und des heute praktizierten V-Stils nicht generell übertragbar.

Dank des technischen Fortschritts im Bereich der Messtechnik standen immer leistungsfähigere Messgeräte zur Erfassung der sportlichen Aktivitäten auf der Schanze zur Verfügung. Mit Hilfe von Filmtechnik wurden Verfahren entwickelt, um die Körperhaltung der Athleten genauer zu erfassen. Im Bereich der Simulation führte dies zur Einführung von beweglichen Mehrkörpermodellen des Athleten.

Mahnke [1990] nutzte numerische Verfahren zur Ableitung individueller Technikzielstellungen für verschiedene Athleten. Das System Springer-Ski wurde zwar als Punktmasse modelliert, die unterschiedlichen Flughaltungen jedoch wurden durch zeitliche Verläufe von Auftrieb und Widerstand, wie sie für verschiedene Körper- und Skihaltungen im Windkanal ermittelt wurden, berücksichtigt. Über eine Zielfunktion[3] wurden die günstigsten Wertepaare für Auftrieb und Widerstand ermittelt, die dann zu einer Optimalvariante zusammengesetzt wurden. Im Ergebnis wurden getrennte Anstellwinkel für Unter- und Oberkörper sowie für die Skier abgeleitet.

Typisch für derartige Modelle ist die Abhängigkeit von gewissen Anfangsbedingungen. Vielfach wurden die Auswirkungen verschiedener Anlauf- und Absprunggeschwindigkeiten auf die erreichbare Flugweite untersucht.

Modelle, die sich auf die Haltung des Athleten und die damit verbundenen Luftkräfte beschränken, haben jedoch einen entscheidenden Nachteil. Optimale Flughaltungen werden nur für bestimmte Flugabschnitte berechnet. Dabei ist aber nicht sichergestellt, dass ein Athlet den Übergang von einer zur nächsten Haltung überhaupt realisieren kann. Hubbard u. a. [1989] entwickelten deshalb ein dynamisches Multisegment-Modell für das Skispringen. Ausgehend vom Anfangsdrehmoment des Systems Skispringer beim Absprung werden die Momente für jedes Körpersegment im dynamischen Modell berücksichtigt. Die internen Gelenkdrehmomente wurden so berechnet, dass der Athlet eine bestimmte Körperhaltung einnimmt. Veränderungen dieser Momente bewirken Haltungsänderungen und haben somit Einfluss auf die berechnete Flugbahn. Diese Erkenntnisse sind leider nicht problemlos auf heutige Springer übertragbar, da die o. a. Untersuchungen von einer parallelen Skiführung ausgehen, die heute nicht mehr eingesetzt wird.

Aus diesem Grund untersuchten Jin u. a. [1995] den Anfang der 90er Jahre vom schwedischen Athleten Jan Boklöv eingeführten V-Stil. Mit einer Vergleichsstudie analysierten sie die Unterschiede in der Ski- und Körperhaltung und deren Auswirkungen auf die Sprungweite. Die notwendigen aerodynamischen Parameter wurden an einem verkleinerten Modell im Windkanal der Universität Tokio gewonnen. Als Besonderheit ist anzumerken, dass die Untersuchungen differenziert für die Übergangsphase und die daran anschließende stabile Flugphase vorgenommen wurden. Die Bestimmung der Körperhaltung des Athleten in den einzelnen Flugabschnitten erfolgte kinemetrisch. Daran wird deutlich, dass keine dynamische Modellierung, wie sie von Hubbard durchgeführt wurde, vorliegt. Lediglich das Anfangsdrehmoment des Athleten beim Absprung wurde im Modell berücksichtigt. Erklärtes Ziel dieser Untersuchungen war, die Abhängigkeit der Weite vom Sprungstil zu untersuchen. Fragen der Haltungssteuerung des Athleten blieben bewusst ausgeklammert.

2.4.2 Grundlagen der Modellbildung

Ausgangspunkt für Simulationsrechnungen im Skisprung sind die Newtonschen Gesetze der Mechanik. Wenn eine stetige Anströmung angenommen wird, kann die Bewegung des Athleten[4] in einer vertikalen Ebene durch Differentialgleichungen beschrieben werden.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F_W \cdot cos(\beta) + F_A \cdot sin(\beta) \\ m\ddot{y} &= F_W \cdot sin(\beta) + F_A \cdot cos(\beta) - m \cdot g \end{aligned} \tag{2-1}$$

[3] Der Autor benutzt hierfür den Begriff Optimalitätskriterium.

[4] Für eine erste Näherung wird von einem Punktmassenmodell ausgegangen.

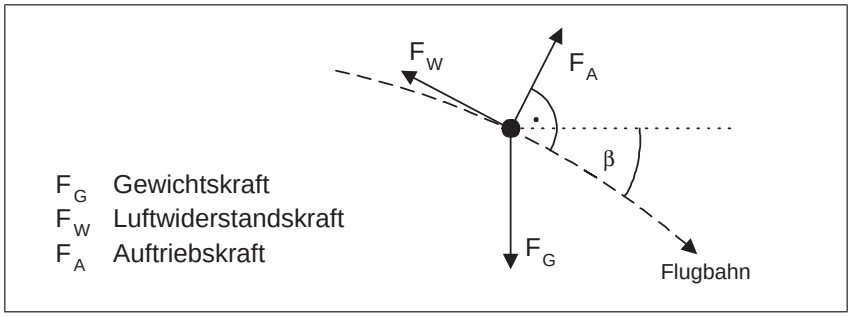

Abb. 2-5: *Kraftwirkungen auf das System Skispringer während der Flugphase*

mit

F_W	Widerstandskraft [N]
F_A	Auftriebskraft [N]
m	Gesamtmasse des Systems Skispringer [kg]
$\ddot{x}, \ddot{y}$	Beschleunigungskomponenten [m/s^2]
β	Bahnwinkel [°]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]

Durch die Bewegung im Medium Luft werden Luftkräfte erzeugt, die von der angeströmten Fläche, der Dichte der Luft, der Strömungsgeschwindigkeit und einem material- und formabhängigen Proportionalitätsfaktor abhängig sind.

$$F_W = C_w \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A}{2}$$
$$F_A = C_a \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A}{2} \qquad (2\text{-}2)$$

mit

C_w	Widerstandsbeiwert
C_a	Auftriebsbeiwert
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
ρ	Dichte des Mediums Luft [kg/m^3]
A	Bezugsfläche [m^2]

Auftrieb und Widerstand stehen senkrecht aufeinander und bilden eine Gesamtluftkraft F_L, die bei unbeschleunigtem Flug betragsmäßig der Gewichtskraft entspricht, aber entgegengesetzt gerichtet ist (vgl. Abb. 2-5).

$$F_L = \sqrt{F_A^2 + F_W^2} = -F_G \qquad (2\text{-}3)$$

Die Erdbeschleunigung in Gl. (2-1) ist breitenabhängig, da die Zentrifugalbeschleunigung der rotierenden Erde berücksichtigt werden muss. Für die Berechnungen kann die tatsächliche Schwere durch die Normalschwere γ_0 ersetzt werden. Nach der Normalschwereformel [Torge 2001] ergibt sich die Schwere für einen Ort der mittleren Breite ϕ auf Meereshöhe zu

$$\gamma_0 = 9,78032677 \left(1 + 0,0053024\ sin^2\ \phi - 5,8 \cdot 10^{-6}\ sin^2\ 2\phi\right) m/s^2. \qquad (2\text{-}4)$$

Die Normalschwere in der mittleren Geländehöhe H berechnet sich mit Hilfe des Freiluftgradienten der Schwere.

$$\gamma = \gamma_0 - (3,0877 \cdot 10^{-6} - 4,3 \cdot 10^{-9}\ sin^2\ \phi) \cdot H \qquad (2\text{-}5)$$

Für die Modellierung ist abzuwägen, wie präzise die Schwere einzuführen ist. Oft genügt es, mit einer mittleren Schwere, z. B. 9,81 m/s^2 zu rechnen [Hochmuth 1981].

Die Luftdichte ρ hat ebenfalls Einfluss auf die Luftkräfte. Für Simulationsrechnungen wird meist eine spezielle Schanze ausgewählt. Über die Geländehöhe und somit den örtlichen Luftdruck, die Lufttemperatur und die individuelle Gaskonstante R berechnet sich die Dichte nach:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \qquad (2\text{-}6)$$

mit

p	Luftdruck [Pa]
$R = 287,05\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	individuelle Gaskonstante von Luft
T	Lufttemperatur [K]

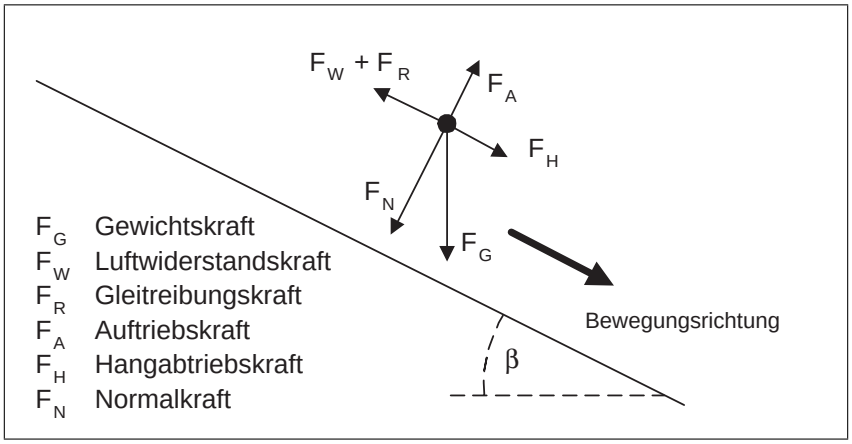

Abb. 2-6: *Kraftwirkungen auf das System Skispringer im Anlaufbereich*

Modellerweiterung für die Anlaufphase

Die Differentialgleichungen (2-1) gelten so nur für die Flugphase. Im Anlaufbereich (vgl. Abb. 2-6) wirken zusätzliche Reibungs- und Unterstützungskräfte durch die Spurführung der Bewegung. Die senkrecht auf die um den Winkel β geneigte Unterstützungsfläche wirkende Normalkraft F_N beträgt

$$F_N = m \cdot g \cdot cos(\beta). \tag{2-7}$$

Die Reibungskraft zwischen Ski und Anlaufbelag wird typischerweise durch das Coulomb´sche Reibungsgesetz beschrieben. Die zur Masse des Gesamtsystems proportionale Normalkraft reduziert sich in geringem Umfang durch die geschwindigkeitsabhängige Auftriebskraft.

$$F_R = \mu\,(F_N - F_A) \tag{2-8}$$

Der materialspezifische Gleitreibungskoeffizient μ ist abhängig von den beteiligten Materialien. Ein sehr kleiner Wert ($\mu = 0,04$) ergibt sich z. B. für die Reibung von Teflon auf Schnee bei -5 ° Celsius [Seifriz 2001]. Der Reibungskoeffizient ist zudem stark geschwindigkeitsabhängig.

Fährt der Athlet durch den Radiusbereich, wirkt zusätzlich eine geschwindigkeitsabhängige Zentrifugalkraft F_Z. Der Anpressdruck erhöht sich und verstärkt somit die Reibungskräfte. Für den Radiusbereich muss (2-8) daher wie folgt erweitert werden.

$$F_R = \mu\,(F_N - F_A + F_Z) \tag{2-9}$$

Die Zentrifugalkraft wird bestimmt durch die Masse des Systems Skispringer und die momentane Geschwindigkeit am Ort der Berechnung. Je kleiner der Anlaufradius beim Bau der Schanze gewählt wurde, desto größere Kräfte wirken auf die Athleten.

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} \tag{2-10}$$

mit

F_Z	Zentrifugalkraft [N]
r	Radius des durchfahrenen Kreisbogens [m]

In Kap. 5.6 ist ein Beispiel für einen aus GPS-Messungen berechneten Kraftverlauf angegeben.

Modellerweiterung für Drehmomente und Drehimpuls

Soll das mathematische Modell eines Skispringers noch genauer an die Natur angepasst werden, dürfen nicht nur die translatorischen Komponenten der Bewegung betrachtet werden. Es treten auch Rotationen des Systems Skispringer auf, da die äußeren Kräfte nicht immer im Massenmittelpunkt angreifen. Während der Fahrt durch den Anlaufradius wird das Gesamtsystem um den Differenzwinkel von Anlauf- und Tischneigung in rückwärtige Richtung rotiert. Beim Absprung setzt der Athlet einen Teil der Energie dazu ein, eine Vorwärtsdrehung auszuführen. Ziel dieser Rotation ist es, einen optimalen Anströmwinkel während der Flugphase zu realisieren. Diese Zusammenhänge wurden bei einfachen numerischen Modellen bisher vernachlässigt.

Das dynamische Grundgesetz gilt analog auch für Drehmoment, Massenträgheitsmoment und Winkelbeschleunigung starrer Körper.

$$M = J \cdot \alpha \tag{2-11}$$

mit

M	Drehmoment [Nm]
J	Massenträgheitsmoment [kg·m^2]
α	Winkelbeschleunigung [rad/s^2]

Wirkt ein konstantes Drehmoment eine bestimmte Zeit lang, erhält man analog zum Impuls bei translatorischen Bewegungen den Drehimpuls. Jedoch wird hierbei nicht die Kraft, sondern das Drehmoment mit der Zeit multipliziert.

$$M \cdot t = J \cdot \omega \tag{2-12}$$

mit

t	Zeit [s]
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

An die Stelle der Masse eines Körpers tritt bei Rotationsbewegungen das Massenträgheitsmoment J, welches sich als integrale Größe wie folgt ergibt.

$$J = \int r^2 \, dm \tag{2-13}$$

mit

r	Abstand eines Masseteilchens von der Rotationsachse [m]
dm	differentielle Masse eines Teilchens [g]

Hier wird die Schwierigkeit bei der Modellierung sichtbar. Der menschliche Körper ist kein einfacher Starrkörper und besitzt auch keine einheitliche Dichte, die in (2-13) oft implizit unterstellt wird. Hinzu kommt, dass gerade beim Absprung entscheidende Haltungsänderungen erfolgen, die zu einer Veränderung des Massenträgheitsmoments führen. Hochmuth [1981] gibt für Rotationen um die Breitenachse des Menschen verschiedene Massenträgheitsmomente an. In gehockter Stellung gilt $J = 4,0...5,0\ kgm^2$, in aufrechter Haltung $J = 10,5...13,0\ kgm^2$. In der Flughaltung der Athleten ist der Hüftwinkel nicht ganz gestreckt, so dass die größeren Werte nicht ganz erreicht werden dürften.

Der Ansatz bei der Modellierung besteht nun darin, den Athlet in einzelne starre Segmente zu unterteilen, die durch Gelenkpunkte miteinander verbunden sind. Nun wird die Bewegung jedes einzelnen Segments modelliert, wobei immer die abhängigen Bewegungen aufgrund der gebildeten Gliederkette beachtet werden müssen. Bewegt sich z. B. der Oberschenkel relativ zum Rumpf, hat dies automatisch eine Bewegung des Unterschenkels und des Fußes zur Folge.

Da diese Art der Modellierung hochgradig komplex ist, werden in der Praxis rechnergestützte Simulationssysteme zur Bewegungsanalyse solcher Mehrkörpersysteme eingesetzt. Als Vertreter seien das Modul *LifeMOD* für das Programmsystem *MSC.ADAMS* der Fa. MSC.Software Corp. oder das System *alaska* vom Institut für Mechatronik Chemnitz mit dem Modul *Dynamicus* als Mensch-Modell genannt.

2.4.3 Inverse Dynamik-Berechnungen

Im vorangegangenen Kapitel stand die Kraft als bewegungsantreibendes Element im Mittelpunkt. Die Simulationen liefern als Ergebnis eines jeden iterativen Rechenschritts die Lage des untersuchten Systems und seine Geschwindigkeit im Raum.

Nun ist es nicht immer möglich, die Kräfte an jeder Stelle mit ausreichender Zuverlässigkeit zu erfassen. Besonders schwierig ist dies in der Flugphase. Jedoch liegen mit kinemetrisch ausgewerteten Videobildern Messwerte über die Lage und Bewegung des Systems Skispringer im Raum vor. Deshalb haben einige Autoren inverse Dynamik-Berechnungen nach folgendem Prinzip durchgeführt.

Bekannt seien die anthropometrischen Daten des Athleten sowie Abmessungen und Masse der Ausrüstung. Weiterhin sei die Lage des Systems Skispringer zur Zeit t (Start) vorgegeben. Aus der Kinemetrie ist der Bewegungszustand zum Zeitpunkt $t + dt$ (Ende) ebenfalls bekannt. Nun besteht die Aufgabe, alle Kräfte und Momente im System so zu bestimmen, dass die Gesetze der Mechanik für den differentiell kleinen Übergang von t nach $t + dt$ erfüllt sind und der betrachtete Modellkörper seine Endlage im Raum tatsächlich erreicht. Dieses Grundprinzip wird so auch

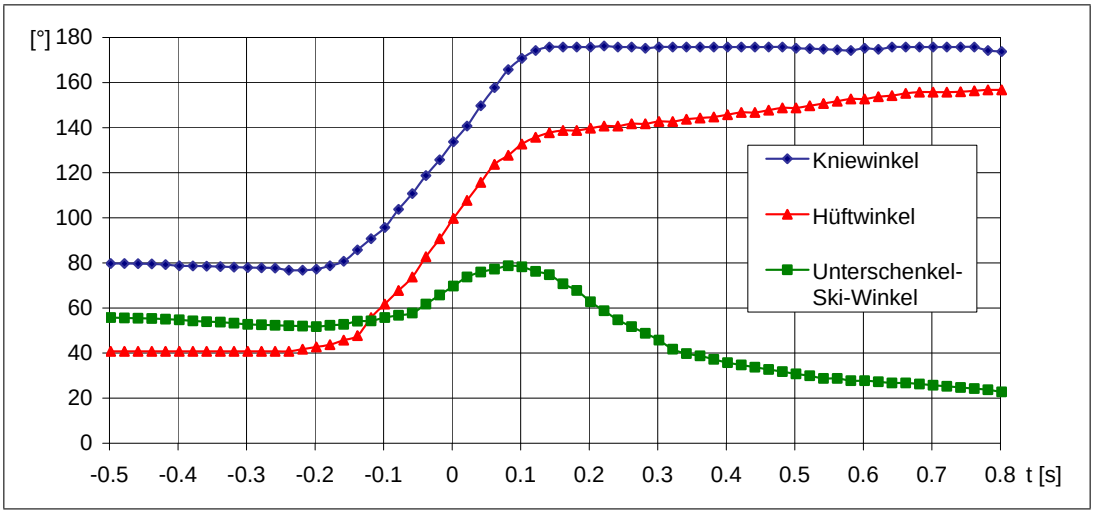

Abb. 2-7: *Winkel-Zeit-Verlauf beim Absprung (nach [Schwameder und Müller 1995])*

auf Mehrkörpersysteme angewandt. Der Rechenaufwand ist relativ hoch, jedoch können auf diese Weise Parameter abgeleitet werden, die nicht direkt messbar sind. Darin besteht der große Vorteil des inversen Ansatzes.

Kaps u. a. [1996] haben die Genauigkeit dieses Rechenverfahrens durch Vergleichsmessungen überprüft. Für einen Sprung wurden die während der Absprungphase auftretenden Bodenreaktionskräfte mit Kraftaufnehmern in Form von Einlegesohlen gemessen. Gleichzeitig wurden mit Videokameras kinemetrischen Daten der Bewegung erhoben und in einer inversen Dynamik-Berechnung weiterverarbeitet. Der Vergleich von berechneten und gemessenen Kraft-Zeit-Verläufen zeigte prinzipiell gleiches Verhalten, wobei jedoch Differenzen von bis zu 10 % der Gesamtkraft auftraten. Diese werden damit begründet, dass zum Einen die Genauigkeit der Kraftaufnehmer begrenzt ist und zum Anderen keine Auftriebskräfte in der Simulation berücksichtigt worden sind.

2.4.4 Kinemetrische Parameter

Oft werden als Eingangsgrößen für die numerische Simulation die individuellen Körperhaltungen des Athleten herangezogen. Diese Parameter werden durch kinemetrische Verfahren ermittelt und z. B. in tabellarischer Form abgelegt. Dabei sind in der Literatur prinzipiell zwei Darstellungsformen zu finden, die beide Vor- und Nachteile aufweisen.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Körperhaltung (Körperwinkel) in Abhängigkeit der Zeit darzustellen [Schwameder und Müller 1995]. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass Winkelgeschwindigkeiten direkt abgeleitet werden können, vgl. Abb. 2-7. Für die numerische Simulation, die im Wesentlichen aus der zeitlichen Integration der Differentialgleichungen besteht, können zu jedem Zeitinkrement dt entsprechende Parameter leicht aus den Tabellen entnommen werden.

Ein Nachteil ist, dass aufgrund der individuell unterschiedlichen Anlaufgeschwindigkeiten keine direkte Aussage über den Ortsbezug eines diskreten Körperhaltungsparameters möglich ist. Aus diesem Grund sind in der Literatur auch Darstellungen in Abhängigkeit vom zurückgelegten Anlauf- bzw. Flugweg s zu finden, z. B. [Arndt u. a. 1995] oder [Mahnke u. a. 2002].

In beiden Fällen können aber weder Raum- noch Zeitbezug losgelöst voneinander betrachtet werden. Für die $f(t)$-Darstellung muss der Nullpunkt ortsbezogen (Schanzentischkanze) gewählt werden. Die Darstellung $f(s)$ erscheint in erster Näherung unkomplizierter, da der Lagebezug aus den Videobildern direkt ableitbar ist. Für eine Simulation muss jedoch iterativ vorgegangen werden. Mit einer genäherten Körperhaltung wird der nächste numerische Integrationsschritt zum Zeitpunkt $t + dt$ durchgeführt. Dabei erhält man den Ort des Springers. Nun können die tatsächlichen Werte aus der Kinemetrie übernommen und in einen erneuten Durchlauf einbezogen werden. Iteratives Vorgehen ist besonders bei sich schnell ändernden Parametern notwendig.

2.4.5 Windkanaluntersuchungen

Untersuchungen zum Strömungs- und Kräfteverhalten im Windkanal sind eng verbunden mit numerischen Simulationsrechnungen, denn die Aerodynamik wird in Form von Auftriebs- und Widerstandskräften sowie bei detaillierteren Modellen auch in Form von Drehmomenten in den Differentialgleichungen benötigt. Die Qualität der Winkanaluntersuchungen beeinflusst direkt die Genauigkeit der Rechenmodelle.

Ziel der Windkanalexperimente ist es, Kenntnisse über Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte sowie die Drehmomente des Systems Skispringer unter verschiedenen Strömungsbedingungen zu erlangen. Dabei wirken sich neben der Haltung auch die Materialeigenschaften des Sprunganzugs sowie die Form, Länge und Oberflächenbeschaffenheit der Skier aus. Deshalb werden Windkanaluntersuchungen immer dann durchgeführt, wenn durch Optimierungen oder verändertes Reglement Änderungen an der Ausstattung der Athleten stattgefunden haben.

In der Entwicklung des Skispringens ist zu beobachten, dass den aerodynamischen Einflussfaktoren aufgrund längerer und breiterer Skier, innovativer Materialien der Sprunganzüge und vor allem durch die heute gebräuchliche Skiführung (V-Stil) immer größeres Gewicht zukommt.

Mroß und Mahnke [1994] untersuchten den Einfluss verschiedener V- und Körperhaltungen auf die Flugweite im Windkanal Dresden/Klotzsche. Methodisch wurde folgendermaßen vorgegangen: Im Luftstrom befand sich eine Testperson in einer speziellen Aufhängung, die mit Messgeräten zur Luftkraftbestimmung verbunden war. Ihre Haltung kontrollierte die Testperson mittels Monitoreinblendung einer seitlich und einer senkrecht ausgerichteten Kamera. Aus den Videobildern wurden Winkel für die V-Stellung, die Kantung der Ski sowie für die Körperhaltung abgeleitet und als Parameter in ein numerisches Punktmasse-Modell eingeführt.

Anhand der aktuell gemessenen Luftkräfte wurde eine Flugweite berechnet. Um Modellabweichungen von der Realität weitestgehend zu eliminieren, wurden Referenzhaltungen als Vergleichsgrößen eingeführt. Es wurde untersucht, wie Änderungen der Ski- und Körperhaltungswinkel die Referenzweite beeinflussen. Die absolute Weite spielte dabei eine untergeordnete Rolle.

Weitere Untersuchungen in dieser Richtung wurden von Luhtanen u. a. [2000] unternommen. Hierbei kam jedoch ein verkleinertes Springermodell zum Einsatz. Eine Aussage der Autoren ist die, dass die Verteilung der Gesamtluftkräfte zwischen Rumpf und Skiern sechzig Prozent zu vierzig Prozent beträgt. Es wurden Fragen zur Winddurchlässigkeit des Sprunganzugs untersucht. Steiferes Material für die Anzüge führt nach Aussagen der Autoren zu stabileren Flughaltungen.

Schmölzer und Müller [2002] haben in ihren Untersuchungen herausgefunden, dass nicht nur das Verhältnis von Auftriebs- zu Widerstandskraft durch den Athleten maximiert werden muss, sondern dass auch der Betrag des Auftriebs maximal werden sollte. Erster Fall wird bereits bei Skianstellwinkeln von 30 Grad erreicht. Der maximale Auftrieb entsteht jedoch erst bei 40 Grad Anstellwinkel. Es wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um den Einfluss des Körpergewichts auf die Sprungweite zu quantifizieren. Mit einer Genauigkeitsabschätzung wird der Einfluss von Messfehlern auf die Rechenergebnisse angegeben.

2.4.6 Simulationsrechnungen zur Optimierung von Skisprungschanzen

Im Skispringen werden Höhenunterschiede von über 100 Metern innerhalb weniger Sekunden überwunden. Dies ist mit gewissen Risiken für die Athleten verbunden. Deshalb kommt der Gestaltung des Schanzenprofils eine entscheidende Bedeutung zu. Ein der Flugbahn optimal angepasstes Profil des Aufsprunghangs sorgt dafür, dass die Flughöhe über Grund in vertretbaren Grenzen verläuft. Im Landebereich muss der Neigungswinkel entsprechend groß sein, damit die Kräfte beim Aufsetzen auf den Hang nicht zu Stürzen und damit verbundenen Gesundheitsschäden bei den Athleten führen [FIS 2001]. Deshalb wurden immer wieder Untersuchungen mit numerischen Flugbahnsimulationen herangezogen, um optimierte Hangprofile zu finden, die sowohl für leistungsschwächere als auch für Spitzenspringer geeignet sind.

Exemplarisch seien die Arbeiten von Gorisek [1993], Müller [1996] oder Müller u. a. [1996] genannt. Die Autoren variieren i. d. R. die Anfangsbedingungen der Simulationsrechnung zu Beginn der Flugphase und erhalten so unterschiedliche Flugbahnen. Das Hangprofil wird nun mit Hilfe der vorgegebenen Trassierungselemente Gerade, Parabel und Kreisbogen bestmöglich angepasst. Dabei spielen auch bautechnische Parameter, wie z. B. die zu bewegenden Erdmengen eine große Rolle.

Bedingt durch ständig weiterentwickelte Flughaltungen, Sprungtechniken und Materialien der Sprunganzüge ergeben sich in der Praxis veränderte Flugbahnen, die regelmäßig überprüft werden müssen. Oftmals wurden daraufhin Änderungen in der Internationalen Wettkampfordnung vorgenommen, nicht nur, um den Zuschauern attraktive Wettkämpfe zu bieten, sondern auch zum Schutz der Athleten.

3 Zur GPS-Mehrdeutigkeitsbestimmung

Grundlage für zentimetergenaue GPS-Positionierungen ist die Auswertung der Phasenmessungen. Die Hauptschwierigkeit dabei besteht in der zuverlässigen und möglichst schnellen Auflösung der Mehrdeutigkeiten. Die in den letzten Jahren stetig gestiegene Zahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema bekundet das generelle Interesse der Wissenschaft und der Industrie an dieser entscheidenden Frage. Kim und Langley [2000] berichten von 325 Publikationen in den Jahren 1981 bis 1999.

Dieses Kapitel beschreibt die Grundprinzipien der Phasenauswertung in dem Umfang, der zum Verständnis des in der Arbeit entwickelten Lösungsansatzes notwendig ist. Eine vollständige Darstellung des Problemkreises ist aufgrund der Vielzahl von Methoden und Varianten nicht möglich. Für spezielle Aspekte sei auf die zahlreich erschienene Literatur verwiesen.

Es ist ohnehin problematisch, die verschiedenen Lösungsstrategien direkt miteinander zu vergleichen, da die meisten Algorithmen nur unter speziellen Voraussetzungen optimal funktionieren. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden deshalb Softwaretests zur Mehrdeutigkeitslösung unter erschwerten Bedingungen vorgestellt. Daraus leiten sich wichtige konzeptionelle Rahmenbedingungen für das in dieser Arbeit vorgestellte Messverfahren ab.

3.1 Die Beobachtungsgleichungen

Die Beobachtungsgleichungen für Code- und Phasenmessungen (z. B. nach [Leick 1995]) in ihrer undifferenzierten Form enthalten eine Reihe von Einflussgrößen, die eine zentimetergenaue Absolut-Positionierung verhindern. Tiefgestellte Indices symbolisieren den Empfänger, hochgestellte den Satelliten.

$$\begin{aligned} C_a^i &= R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + \delta h_{a(C)} - \delta t^i - \delta h_{(C)}^i \right) + d_{a,iono}^i + d_{a,tropo}^i + \varepsilon_{a(C)}^i \\ \Phi_a^i &= R_a^i + c_0 \left(\delta t_a + \delta h_{a(\phi)} - \delta t^i - \delta h_{(\phi)}^i \right) - d_{a,iono}^i + d_{a,tropo}^i + \lambda \cdot N_a^i + \varepsilon_{a(\phi)}^i \\ R_a^i &= |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \end{aligned} \tag{3-1}$$

mit

C_a^i	Codemessung von Station a zu Satellit i [m]
Φ_a^i	Phasenmessung von Station a zu Satellit i [m]
R_a^i	geometrische Entfernung Satellit i - Empfänger a, aus kart. Koordinaten $\vec{X}$ [m]
c_0	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit [m/s]
δt_a	Empfängeruhrfehler [s]
$\delta h_{a(C)}, \delta h_{a(\phi)}$	instrumentelle Signalverzögerung für Code und Phasen, Empfänger a [s]
δt^i	Satellitenuhrrestfehler nach der Korrektur [s]
$\delta h_{(C)}^i, \delta h_{(\phi)}^i$	instrumentelle Signalverzögerungen für Code und Phasen, Satellit i [s]
$d_{a,iono}^i$	ionosphärische Refraktion [m]
$d_{a,tropo}^i$	unmodellierter troposphärischer Refraktionseinfluss [m]
N_a^i	Anzahl ganzer Wellenlängen (Phasenmehrdeutigkeit) [-]
λ	Wellenlänge des Signals [m]
$\varepsilon_{a(C)}^i, \varepsilon_{a(\phi)}^i$	zufällige Restfehler incl. Mehrwegeausbreitungseinflüsse für Code- und Phasenmessung [m]

Codemessungen stellen im Unterschied zu Phasenmessungen praktisch eindeutige Pseudostrecken dar. Aufgrund nicht modellierbarer Fehleranteile, wie z. B. instrumentellen Signalverzögerungen, ist die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten durch Differenzbildung von Code- und Phasenmessungen nicht möglich. Es treten i. d. R. Fehlereinflüsse in der Größenordnung mehrerer Wellenlängen auf. Verschiedene Autoren geben das Messrauschen des C/A-Codes mit 2 – 10 m bzw. der Trägerphasenmessungen mit 0,2 – 5 mm an [Hofmann-Wellenhof u. a. 2001], [Spilker Jr. und Parkinson 1996].

3.2 Beobachtungsdifferenzen

Spezielle Einflussgrößen wirken auf benachbarte Empfangsstationen in gleicher oder zumindest ähnlicher Weise. Die Phasenmessungen der Stationen sind untereinander somit physikalisch korreliert. Mathematisch können nun künstliche Beobachtungsgrößen durch Differenzbildung der orignalen Messwerte erzeugt werden, die damit weitestgehend frei von diesen Fehlereinflüssen sind.

Als erste Differenzbeobachtung sei die Satelliten-Einfachdifferenz genannt, die aus zeitgleichen Messungen zweier Empfänger zu je einem Satelliten gebildet wird. Nach (3-1) heben sich, bis auf meist vernachlässigte differentielle Restfehler, Orbit- und Satellitenuhrfehler auf. Ebenso werden Refraktionseinflüsse der Ionosphäre und Troposphäre weitestgehend eliminiert. Für die Phasenmessung gilt dabei

$$\Delta\Phi^i_{a,b} = \Phi^i_b - \Phi^i_a. \tag{3-2}$$

Die gleiche Überlegung kann auch für zwei Satelliten und einen Empfänger angestellt werden. Durch Differenzbildung zwischen Messungen eines Empfängers zu zwei Satelliten können Effekte der Empfängeruhr eliminiert werden. Hofmann-Wellenhof u. a. [2001] haben dargelegt, das die Differenzsignale frei von Korrelationen sind.

Wichtige künstliche Beobachtungsgrößen sind die sog. doppelten Differenzen, die unter Benutzung von zwei Stationen und Messungen zu je zwei Satelliten gebildet werden. Der Notation von Wanninger [1996] folgend, gilt

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\Phi^{i,j}_{a,b} &= \Delta\Phi^j_{a,b} - \Delta\Phi^i_{a,b} \\ &= \nabla\Delta R^{i,j}_{a,b} - \nabla\Delta d^{i,j}_{a,b,iono} + \nabla\Delta d^{i,j}_{a,b,tropo} + \lambda\cdot\nabla\Delta N^{i,j}_{a,b} + \varepsilon^{i,j}_{a,b(\nabla\Delta\phi)} \\ \text{mit} & \\ \nabla\Delta R^{i,j}_{a,b} &= |\vec{X}^j - \vec{X}_b| - |\vec{X}^j - \vec{X}_a| - |\vec{X}^i - \vec{X}_b| + |\vec{X}^i - \vec{X}_a| \\ &= |\vec{X}^i - \vec{X}_a| - |\vec{X}^i - (\vec{X}_a + \Delta\vec{X}_{ab})| - |\vec{X}^j - \vec{X}_a| + |\vec{X}^j - (\vec{X}_a + \Delta\vec{X}_{ab})|. \end{aligned} \tag{3-3}$$

Dabei enthält der Doppeldifferenz-Entfernungsterm $\nabla\Delta R$ den gesuchten Koordinatenunterschied zwischen Referenz- und Roverantenne. Die Bildung doppelter Differenzen verringert zwar Einflüsse von Orbitfehlern und Refraktion und eliminiert Uhrfehler sowie Hardwareverzögerungen, jedoch verstärken sich die Auswirkungen von Mehrwegeausbreitung und Messrauschen. Im Unterschied zu Einfachdifferenzen sind diese Beobachtungsgrößen aufgrund ihrer Korrelationen nicht unabhängig voneinander. Ein mathematischer Beweis ist in [Hofmann-Wellenhof u. a. 2001] zu finden.

Ein wichtiges Kriterium für die Auswertung ist die Unterbrechungsfreiheit der Phasenmessung. Verliert der Empfänger z. B. durch eine Abschattung das Eingangssignal, geht die Phasenbeziehung zwischen intern generiertem und empfangenem Signal verloren. Damit wird die Anfangsmehrdeutigkeit für dieses Signal ungültig. Zur Prüfung des kontinuierlichen Signalempfangs eignen sich die Dreifachdifferenzbeobachtungen. Diese werden aus zeitlich aufeinanderfolgenden Doppeldifferenzen gebildet. Somit heben sich fast alle Restfehlereinflüsse und vor allem die unbekannten Mehrdeutigkeiten auf. Im ungestörten Fall entsteht ein glatter zeitlicher Verlauf. Eine Unstetigkeit deutet dann auf eine Signalunterbrechung hin. Im Auswerteprozess wird versucht, solche Sprünge rechentechnisch zu eliminieren. Entweder kann die Größe der Unstetigkeit als Vielfaches der Wellenlänge bestimmt werden oder es ist eine neue unbekannte Mehrdeutigkeit in die Auswertung einzuführen.

3.3 Linearkombinationen

Ein weiteres Hilfsmittel bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten sind Linearkombinationen. Liegen Beobachtungen auf zwei Frequenzen vor, können nach dem Prinzip

$$\phi_{n,m} = n\cdot\phi_1 + m\cdot\phi_2 \qquad (\phi \quad Phasenmessung\,[Zyklen]) \tag{3-4}$$

neue Signale gebildet werden. Analog gilt dies für die Berechnung der Frequenz der neu entstanden Linearkombination. Phasenmessungen in metrischen Einheiten werden wie folgt linear kombiniert [Wübbena 1991].

$$\Phi_i = a_i\cdot\Phi_1 + b_i\cdot\Phi_2 \qquad (\Phi \quad Phasenmessung\,[m]) \tag{3-5}$$

Die Parameter a und b können aus dem Verhältnis der Wellenlängen und den Koeffizienten n bzw. m abgeleitet werden.

$$a_i = n\frac{\lambda_{n,m}}{\lambda_1} \qquad \text{bzw.} \qquad b_i = m\frac{\lambda_{n,m}}{\lambda_2} \tag{3-6}$$

Gleiches Schema gilt auch für die Mehrdeutigkeiten. Werden für die Koeffizienten nur ganzzahlige Werte eingesetzt, behalten auch die Mehrdeutigkeiten die Eigenschaft der Ganzzahligkeit. Wichtige Linearkombinationen nach Wübbena [1991] und Wanninger [1994] sind in Tab. 3-1 zusammengestellt. Der ionosphärische Einfluss auf eine Koordinatenlösung wird dabei durch den ionosphärischen Verstärkungsfaktor V_i reflektiert. V_i/λ stellt den Einfluss der Ionosphäre auf die Mehrdeutigkeitslösung dar, σ ist das Rauschen der Beobachtung.

Mit Hilfe von Linearkombinationen können Signale erzeugt werden, die spezielle Eigenschaften aufweisen. Das *widelane*-Signal z. B. hat eine deutlich größere Wellenlänge, jedoch auch ein stärkeres Beobachtungsrauschen. Ist das Mehrdeutigkeitsproblem für zwei Linearkombinationen gelöst, können auch die Mehrdeutigkeiten der Originalsignale

Tab. 3-1: *Auswahl ganzzahliger Linearkombinationen für Zweifrequenz-Phasenmessungen*

	Signal	n	m	λ [cm]	V_i [-]	V_i/λ [1/m]	σ [mm]
Originalsignal	L_1	1	0	19,0	0,779	4,1	3,0
Originalsignal	L_2	0	1	24,4	1,283	5,3	3,9
Widelane	L_W	1	-1	86,2	-1,000	-1,2	19,4
Narrowlane	L_N	1	1	10,7	1,000	9,3	2,4
ionosphären-frei	L_0	77	-60	0,6	0,000	0,0	9,8

berechnet werden. Durch Bildung des L_0-Signals werden ionosphärische Einflüsse erster Ordnung eliminiert. Dies ist besonders für längere Basislinien zwischen beiden Empfangsstationen von Bedeutung.

Zur endgültigen Koordinatenberechnung wird ein Signal mit möglichst geringem Messrauschen und geringen Mehrwegeeinflüssen bevorzugt. In der Praxis wird bei kurzen Basislinien die L_1-Lösung zur Koordinatenberechnung herangezogen. Sind z. B. bei langen Basislinien die ionosphärischen Restfehler sehr groß, wird oftmals die L_0-Linearkombination benutzt.

3.4 Die Trägerphasenmehrdeutigkeit

Die Doppeldifferenz-Beobachtungsgleichung (3-3) für die Phasenmessung kann nach dem Mehrdeutigkeitsterm aufgelöst werden.

$$\nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} = \frac{1}{\lambda}\left(\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} + \nabla\Delta d_{a,b,iono}^{i,j} - \nabla\Delta d_{a,b,tropo}^{i,j} - \varepsilon_{a,b(\nabla\Delta\phi)}^{i,j}\right) \tag{3-7}$$

Nun wird deutlich, dass bei geometrischen Verfahren die ionosphärischen und troposphärischen Restfehlereinflüsse gemeinsam mit dem Rauschen ε und der Genauigkeit der Näherungskoordinaten verantwortlich für die Festsetzbarkeit der Mehrdeutigkeiten auf ganze Zahlen sind. Die Bestimmung vereinfacht sich, je größer die Wellenlänge des Signals ist, je genauer der Basislinienvektor $\Delta\vec{X}_{ab}$ (vgl. (3-3)) vorab bekannt ist und je geringer der Abstand zwischen den Empfangsstationen ist. Durch eine lange Messdauer wirken Mittelungseffekte von Mehrwegeausbreitungseinflüssen und Empfängerrauschen begünstigend auf die Mehrdeutigkeitslösung.

Die Näherungskoordinaten können anfänglich aus differentiellen Codebeobachtungen berechnet werden, wobei spezielle Trägerphasenglättungen zur Genauigkeitssteigerung angewandt werden. Jedoch können hierbei genauigkeitsrelevante Effekte durch Signalmehrwegeausbreitung auftreten. Man verbessert die Näherungslösungen iterativ im Zuge der Mehrdeutigkeitsbestimmungen. Dazu können in einem weiteren Schritt Doppeldifferenz-*float*-Lösungen genutzt werden. Hier wird der unbekannte Basislinienvektor gemeinsam mit den Mehrdeutigkeiten bestimmt, wobei aber die Mehrdeutigkeitsterme noch nicht auf ganze Zahlen fixiert sind. Die *float*-Lösungen liefern je nach Dauer der kontinuierlichen Messung Näherungskoordinaten im Zentimeter- bis Dezimeter-Genauigkeitsbereich.

3.5 Klassifikation der GPS-Verfahren

Bis zu einem gewissen Punkt läuft die Auswertung der GPS-Messungen nahezu identisch für alle Messverfahren ab. Nun sind jedoch differenzierte Betrachtungen notwendig. Für die weiteren Berechnungs- und Auswertealgorithmen sind folgende Kriterien entscheidend.

- Bei der **statischen Positionsbestimmung** verbleibt der Empfänger für die Dauer der Messung auf dem zu bestimmenden Punkt. Im Ergebnis wird eine Position berechnet, die sich aus dem Mittel über alle beobachteten Einzelepochen ergibt. Mit diesem Verfahren sind unter optimalen Randbedingungen höchste Koordinatengenauigkeiten bis in den Millimeterbereich möglich. Die Dauer der Messung hat hier einen großen Einfluss.
- Bei der **kinematischen Positionierung** ist der Zwang der Unveränderlichkeit des Vektors zwischen Referenzstation a und der sog. Roverstation b aufgehoben. Bei diesem Verfahren ist der Nutzer an Koordinaten für jede einzelne Epoche interessiert. Moderne Empfänger bieten Messraten bis in den Bereich von 20 Hz, wobei die Messwerte nicht vollständig korrelationsfrei sind.
- Erfolgt die Koordinatenberechnung nach beendeter Messung, spricht man von **post-processing**. Begünstigend für der Bestimmung und Validierung der Mehrdeutigkeiten ist, dass nicht nur eine Einzelepoche, sondern die über den gesamten Zeitraum der Messung erfassten Daten zur Verfügung stehen. Das wirkt sich prinzipiell positiv auf die Zuverlässigkeit der Algorithmen aus.

- Im Gegensatz dazu steht die **Echtzeit**-Berechnung der Koordinaten, die im englischen als *Real Time Kinematic* (RTK) bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren werden in einer möglichst kurzen Zeitspanne Daten gesammelt, mit denen die Anfangsmehrdeutigkeiten festgesetzt werden. Dies gelingt bei kurzen Basislinien und ausreichend vielen Satelliten (>5) i. d. R. in $1-2$ Minuten. Für die notwendige differentielle Berechnung werden die Daten der Referenzstation mittels Funkübertragung zum Nutzer gesendet.
- Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Verfügbarkeit mehrerer Trägerfrequenzen. **Einfrequenz**-Daten erschweren im Gegensatz zu **Zweifrequenz**-Messungen die Mehrdeutigkeitslösung, da keine Linearkombinationen mit großen Wellenlängen gebildet werden können. Es muss eine viel größere Zahl potentieller Lösungen ausgeschlossen werden. Auf längeren Basislinien wirken sich zudem ionosphärische Refraktionsresteinflüsse stärker aus. Diese können mit Zweifrequenzmessungen weitestgehend eliminiert werden.

Die aufgeführten Randbedingungen haben Einfluss auf die Gestaltung, die Geschwindigkeit und die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitsbestimmung. Dadurch wird nicht zuletzt auch die Qualität der Ergebnisse bestimmt. Es existiert eine große Anzahl verschiedener Rechenverfahren. Abb. 3-1 vermittelt einen Überblick über ausgewählte Algorithmen.

3.6 Geometrische Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung

3.6.1 Methode der sequentiellen vermittelnden Ausgleichung

Ein Standardverfahren seit den frühesten Jahren der geodätischen Nutzung von GPS ist die Mehrdeutigkeits- und Koordinatenberechnung über eine sequentielle vermittelnde Ausgleichung. Dieser z. B. in [Bauer 1997] beschriebene Ansatz ist für statische Messungen mit genügend langer Beobachtungsdauer geeignet. Zur Reduktion bzw. Eliminierung instrumenteller Verzögerungen wird generell mit doppelten Differenzen gearbeitet.

Die linearisierten Beobachtungsgleichungen bilden ein Gleichungssystem, welches mit einem vermittelnden Ausgleichungsansatz gelöst werden kann. Jedoch sind die Mehrdeutigkeiten und der gesuchte Koordinatenunterschied der Einzelepochen korreliert. Dies führt zu numerisch instabilen Lösungen.

Das Ausgleichungsmodell wird maßgeblich bestimmt durch die Satellitengeometrie. Aufgrund der Satellitenbewegung während einer genügend langen Beobachtungsdauer entstehen neue Beobachtungsgleichungen unter veränderten geometrischen Bedingungen. Die gemeinsame Ausgleichung all dieser Beobachtungen liefert numerisch stabile Lösungen. Liegen kontinuierliche Beobachtungen über einen ausreichend langen Zeitraum vor, ergeben sich i. d. R. nahe an Ganzzahlen liegende Mehrdeutigkeitswerte, die dann ganzzahlig festgesetzt werden können.

Da aber die dazu notwendige Beobachtungsdauer eher im Stunden- als im Minutenbereich liegt, eignet sich diese Methode nur bedingt für praktische Anwendungen. Die Anforderungen der Vermessungspraxis sprechen gegen den Einsatz des Verfahrens. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen ist heute eine extrem kurze Messdauer gefragt.

3.6.2 Das Prinzip der Mehrdeutigkeitssuche

Die meisten veröffentlichten Algorithmen zur Mehrdeutigkeitsproblematik gehören zur Gruppe der geometrischen Verfahren, vgl. Abb. 3-1, und bedienen sich sog. Suchalgorithmen. Das prinzipielle Vorgehen besteht zunächst darin, mit möglichst guten Näherungskoordinaten über die Ausgleichungsmethode der kleinsten Quadrate (GAUSS-MARKOV-Modell) eine bestmögliche Schätzung für den Koordinaten- und Mehrdeutigkeitsvektor zu erhalten. Dabei sind die Mehrdeutigkeiten vorerst noch reellwertig. Diese Lösung wird als *float*-Lösung bezeichnet und kann auch für Einzelepochen berechnet werden.

Iterativ wird die soeben ermittelte Lösung als verbesserte Näherung in das Ausgleichungsmodell eingeführt. Bei kurzen Basislinien und geringen ionosphärischen Restfehlereinflüssen liegen die geschätzten Mehrdeutigkeiten i. d. R. nahe einer ganzen Zahl.

Da es sich hierbei noch nicht um die wahre Lösung handelt, wird mit Hilfe der *float*-Werte und den aus der Ausgleichung ermittelten Standardabweichungen ein n-dimensionaler Suchraum aufgebaut, der in jedem Fall die wahre Lösung enthalten muss. Die Dimension n ergibt sich aus der Anzahl der unabhängigen Doppeldifferenzmehrdeutigkeiten. Im Normalfall befindet sich darin eine sehr große Anzahl Lösungsvektoren, die nicht alle einzeln getestet werden können.

Nun setzen verschiedene Autoren unterschiedliche Techniken ein, um durch Verkleinerung des Suchraums möglichst viele Kombinationen auszuschließen. Durch Einführung von Bedingungen, wie z. B. der Forderung nach Ganzzahligkeit der Mehrdeutigkeitslösung, kann zusätzlich der kontinuierliche Lösungsraum auf die Schnittpunkte ganzzahliger Werte reduziert werden. Weitere Ansätze bestehen darin, durch geeignete Transformationen den Lösungsraum zu dekorrelieren und damit zu verkleinern. Auf dieses Verfahren wird später noch eingegangen.

Die Suche nach dem richtigen Lösungsvektor besteht nun darin, jede ganzzahlige Kombination einzeln in das Ausgleichungsmodell einzusetzen und entsprechende Koordinaten- und Mehrdeutigkeitsschätzungen zu berechnen. Durch

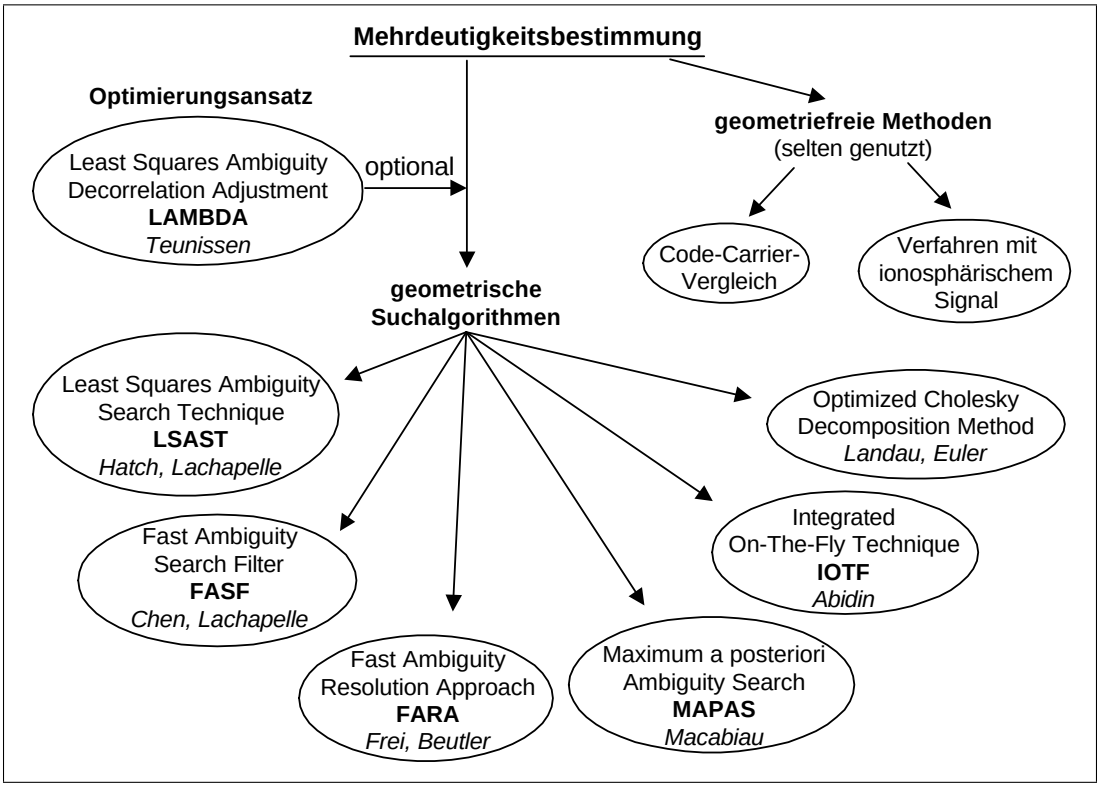

Abb. 3-1: *Übersicht ausgewählter Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung sowie die damit verbundenen Namen der Entwickler (kursiv).*

die Ausgleichung wird die L_2-Norm des Verbesserungsvektors minimiert. Dieser Parameter dient später zur Qualitätsbeurteilung. Ist die beste Lösung gefunden worden, können die reellen Mehrdeutigkeitswerte auf die ganzzahligen Werte des wahrscheinlichsten Lösungsvektors festgesetzt werden.

Dieser Ablauf beginnt meist mit der Berechnung der Mehrdeutigkeiten einer *widelane*-Linearkombination. Werden Doppeldifferenzen aus trägerphasengeglätteten Code-Lösungen zur Bestimmung der Näherungslösung für den Basisvektor benutzt, ergibt sich ein Suchraum mit ± 1 m bis ± 2 m Ausdehnung. Dies entspricht $\pm 11\lambda_1$ im Mehrdeutigkeits-Lösungsraum. Durch Verwendung der *widelane*-Linearkombination reduziert sich dieser auf nur $\pm 3\lambda_W$. Hunderte Lösungsvektoren können somit von vornherein ausgeschlossen werden [Cosentino und Diggle 1996]. Die Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeiten beliebiger Linearkombinationen lassen sich berechnen, wenn diese bereits für zwei Signale gefunden worden sind.

3.6.3 Suchraumdekorrelation mit der *LAMBDA*-Methode

Die Bildung doppelter Differenzen hat den Vorteil, dass viele Einflussfaktoren eliminiert werden. Jedoch entstehen dadurch starke mathematische Korrelationen, die den Suchraum für die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten extrem ausweiten können. Die rechentechnischen Anforderungen zur Lösung des Problems steigen deutlich.

Der von Teunissen Anfang der 90er Jahre entwickelte *Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA)*-Algorithmus (z. B. [Teunissen 1996]) setzt genau an dieser Stelle an. Mit Hilfe einer *float*-Lösung wird ein Suchbereich definiert, der die ganzzahlige wahre Lösung enthält. Gerade bei kurzer Beobachtungsdauer sind die Konfidenzellipsen, die den Lösungsbereich beschreiben, stark verzerrt. Als Folge müssten sehr viele Varianten berechnet werden.

Der Ansatz besteht nun darin, den Mehrdeutigkeitssuchraum mit Hilfe sog. Z-Transformationen so zu transformieren, dass sich die mathematischen Korrelationen deutlich verringern. Dadurch entsteht ein mehr kugelförmiger Suchraum. Das Mehrdeutigkeitsproblem wird mit sequentiellen Ausgleichungsalgorithmen nach der Methode der Kleinsten Quadrate im transformierten Suchraum durchgeführt. Die verringerten Korrelationen bewirken eine genauere Schätzung, da das Modell ursprünglich für unkorrelierte Beobachtungen entwickelt wurde. Anschließend werden die Ergebnisse mit einer inversen Z-Transformation in den Ausgangsbereich zurückgeführt.

Eine Eigenschaft der Z-Transformation ist, dass nicht nur die Transformationsmatrix, sondern auch ihre Inverse regulär und rein ganzzahlig ist. Damit bleibt die Ganzzahligkeit der Doppeldifferenzmehrdeutigkeiten im transformierten Suchraum erhalten. Eine Forderung an die Transformationsmatrix Z ist, dass das Suchraumvolumen unverändert

bleibt. Dadurch verringern sich die z.T. extremen Ausdehnungen. Die Varianz-Kovarianz-Matrix nähert sich einer Diagonalmatrix mit geringeren Korrelationen als im Originalsuchraum [Teunissen u. a. 1996].

Der Aufwand zur Durchführung der Z-Transformationen wird als unerheblich eingeschätzt. Die Einsparung an Berechnungsschritten bei der Mehrdeutigkeitssuche im transformierten Suchbereich überwiegt. Zur weiteren Steigerung der Effektivität werden Ausgleichungsalgorithmen mit dem Zwang zur Ganzzahligkeit des Mehrdeutigkeitsvektors eingesetzt, die im Englischen als *Integer Least Squares*-Algorithmen bezeichnet werden.

3.6.4 Teststatistik

Viele der in der Literatur veröffentlichten Verfahren sind bzgl. ihrer Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nicht direkt miteinander vergleichbar. Dies ist u. a. zurückzuführen auf die Komplexität des GPS-Systems und der Signalausbreitung. Kim und Langley [2000] nennen als Grund den hohen Spezialisierungsgrad einzelner Forschergruppen auf ihre individuellen Anforderungen. Dadurch entstanden Algorithmen, die z. B. nur für lange Basislinien oder nur für Echtzeitlösungen im Nahbereich geeignet sind. Aufgrund unzureichender Spezialkenntnisse ist es den Forschergruppen meist nicht möglich, die jeweils anderen Algorithmen für die eigenen Lösungen anzupassen. Nicht zuletzt spielen auch die unterschiedlichen Eigenschaften der Messdaten aufgrund verschiedenartiger Empfänger und Software eine Rolle.

Der Entwicklungstrend der letzten Dekade ging in Richtung Leistungssteigerung und Optimierung des Rechenaufwands zur Realisierung von Echtzeit-Applikationen. Dabei wurden vergleichsweise geringe Anstrengungen zur Generalisierung des funktionalen und stochastischen Modells zur Parameterschätzung unternommen. Es fehlen bislang einheitliche Kriterien zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit.

Hier sollen einige Testmöglichkeiten erwähnt werden, die von verschiedenen Autoren zur Qualitätssicherung erfolgreich eingesetzt wurden. Die Beurteilung der Richtigkeit einer Mehrdeutigkeitslösung, mit welchem Verfahren auch immer sie berechnet wurde, kann durch einen sog. Ratio-Test erfolgen. Dazu wird das Verhältnis der empirischen Standardabweichungen s von bester und zweitbester Lösung gegen einen statischen Grenzwert getestet. Die Aufgabe ist eindeutig gelöst, wenn sich eine i. d. R. ganzzahlige (beste) Mehrdeutigkeitslösung signifikant von den anderen (zweitbesten Lösung) unterscheidet.

$$\frac{s_i}{s_{min}} > k. \tag{3-8}$$

Der Grenzwert $k = 2...3$ wurde empirisch bestimmt [Hofmann-Wellenhof u. a. 2001]. Hatch und Euler [1994] berichten von einer hohen Zuverlässigkeit des Test in der *Leica*-GPS-Software. Jedoch ist Vorsicht geboten, denn es werden nur Zahlen in Relation zueinander und nicht bzgl. ihres Absolutwertes betrachtet.

Ein weiterer gebräuchlicher Test ist der statistische Globaltest. Er wird zur Überprüfung von *a priori*- und *a posteriori*-Standardabweichungen herangezogen. Bei vorgegebenem Signifikanzniveau wird untersucht, ob beide Standardabweichungen übereinstimmen und somit keine Fehler vorliegen (Nullhypothese). Eine abgewandelte Variante dieses Tests untersucht die Änderung des Ortsvektors zwischen Referenz- und Roverstation. Dieser darf bei ausreichend guter Näherungslösung nicht signifikant von der *fixed*-Lösung abweichen.

Eine in der Praxis statischer Punktbestimmungen häufig verwendete Kontrolle ist die Prüfung von Dreiecksschlüssen auf Koordinatenebene. Drei Vektoren bilden die Seiten eines Dreiecks. Wurden alle drei Seiten durch basislinienweise Auswertung berechnet, liegt eine Überbestimmung vor, denn nur zwei der drei Vektoren sind unabhängig voneinander. Durch vektorielle Addition wird eine geschlossene Schleife über alle drei Punkte gebildet. Damit ergibt sich ein Schleifenschlussfehler, der zur Beurteilung der Richtigkeit der drei Basislinien herangezogen werden kann. Eine zu große Abweichung deutet auf einen Fehler in einer oder mehreren beteiligten Basislinien hin. Zur Identifizierung der fehlerhaften Basislinie müssen ggf. weitere Messungselemente herangezogen werden.

3.7 Geometriefreie Methoden zur Mehrdeutigkeitsbestimmung

Neben den geometrischen Methoden mit Berücksichtigung der aktuellen Satelliten-Empfänger-Konstellation gibt es zwei Verfahren, die geometrieunabhängig arbeiten. Das ist das Verfahren unter Nutzung des sog. ionosphärischen Signals sowie ein als *Code-Carrier*-Vergleich bezeichneter Algorithmus.

Für beide Varianten sind keine Näherungskoordinaten zur Mehrdeutigkeitsbestimmung notwendig. Außerdem können diese sowohl für statische als auch für kinematische Punktbestimmungen eingesetzt werden. Es sind jedoch einige Randbedingungen zu erfüllen, die den breiten Einsatz der Verfahren in der Praxis bisher eingeschränkt haben. Darauf wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Code-Carrier-Vergleich

Das Prinzip dieses Verfahrens beruht darauf, die mehrdeutige Phasenmessung mit Hilfe der eindeutigen Codemessung zu reduzieren. Dies geschieht auf Ebene doppelter Differenzen, um die instrumentellen Fehlereinflüsse weitestgehend zu eliminieren. Analog zu (3-3) können doppelte Differenzen auch für die Codemessungen gebildet werden.

Die *Code-Carrier*-Differenz wird jedoch nicht aus den doppelten Differenzen der Originalsignale berechnet. Da die ionosphärische Refraktion auf Code- und Phasenmessung mit unterschiedlichem Vorzeichen wirkt, werden statt dessen geeignete Linearkombinationen bevorzugt. Man verwendet die *widelane*-Linearkombination der Phasenmessungen L1 und L2 sowie die *narrowlane*-Kombination der Codemessungen [Xu 2003].

Dieses Verfahren hat aber auch Nachteile. Der Lösungsansatz berücksichtigt nicht die unterschiedliche Qualität von Code- und Phasenmessungen. Deshalb sind Code-Mehrwegeausbreitungseinflüsse sowie das Code-Messrauschen als größte Fehlerquellen zu nennen. Das Verfahren ist nur dann erfolgreich einsetzbar, wenn qualitativ hochwertige Zweifrequenzmessungen für den C/A- bzw. P-Code vorliegen, die gering durch Mehrwegeausbreitungseffekte beeinflusst worden sind. Das kann in der Praxis jedoch nicht immer garantiert werden.

Ionosphärisches Signal

Die metrischen Differenzen aus *narrowlane*- und *widelane*-Linearkombinationen der Phasenmessungen haben die Eigenschaft, dass nur noch Terme der ionosphärischen Refraktion sowie die Mehrdeutigkeitsterme in den Gleichungen verbleiben. Da die *widelane*-Mehrdeutigkeit aber bereits eliminiert werden kann, verbleiben nur noch *narrowlane*-Mehrdeutigkeiten, die vom ionosphärischen Einfluss zum Zeitpunkt der Messung, den Mehrwegeeffekten und dem Beobachtungsrauschen abhängen.

Ist der räumliche Abstand zwischen beiden Empfangsantennen genügend klein, eliminieren sich ebenfalls große Anteile der ionosphärischen Refraktion. Somit können die gesuchten *narrowlane*-Mehrdeutigkeiten aus dem ionosphärischen Signal berechnet werden.

Das Verfahren funktioniert nur zufriedenstellend, wenn die Basislinie maximal wenige Kilometer lang ist und keine nennenswerten ionosphärischen Störungen vorhanden sind. Auch dieses geometriefreie Verfahren ist in der Praxis nicht sehr weit verbreitet.

3.8 Test kommerzieller Software zur kinematischen GPS-Positionierung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf die Schwierigkeiten beim Lösen des Mehrdeutigkeitsproblems eingegangen. Bei GPS-Messungen im Skispringen ergeben sich besonders ungünstige Randbedingungen. Zum Einen ist, wie bereits erwähnt, die Messzeit nur wenige Sekunden lang, zum Anderen ist die Verteilung der wenigen sichtbaren Satelliten meist einseitig. Deshalb wurde untersucht, ob mit Hilfe kommerziell vertriebener Softwarepakete die Positionsberechnung aus den GPS-Messungen eines Skisprungs überhaupt möglich ist. Der Test soll Aussagen über die Zuverlässigkeit und Korrektheit einer Koordinatenlösung gestatten.

Methodik

Die Überprüfung der Richtigkeit einer Lösung ist auf mehreren Ebenen realisierbar. Bei kommerziellen Produkten hat der Nutzer allerdings vielfach keine Möglichkeit, an Zwischenergebnisse der Berechnung zu gelangen. Um trotzdem Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgte die Bewertung auf Koordinatenebene. Dies stellt einen durchgreifenden Test dar, da der Nutzer im Allgemeinen an einer Koordinatenlösung interessiert ist. Das Problem von Koordinatenverschiebungen aufgrund wechselnder Satellitenkonstellationen wurde bei der Berechnung der Solllösung berücksichtigt.

Zum Test standen drei Softwarepakete zur Verfügung, die primär für den Produktionseinsatz im Ingenieurbüro entwickelt worden sind und vollautomatisierte Auswerteabläufe besitzen. Charakteristisch sind die zumeist eingeschränkten Möglichkeiten des Anwenders, in den Berechnungsablauf eingreifen zu können. Der Vergleich zeigt die Stärken und Schwächen der einzelnen Produkte in Bezug auf die Prozessierbarkeit problematischer Datensätze.

Dabei bestand folgendes Testszenario: Die Anzahl verfügbarer Satelliten wurde schrittweise von neun auf vier herabgesetzt. Es wurden die am niedrigsten stehenden Satelliten ausgeschlossen. Damit ergibt sich ein Konstellationsverhalten, wie es nicht nur in urbanen Gebieten, sondern auch in Gebirgstälern und an Schanzen vorzufinden ist.

Die Beobachtungsdauer wurde für jede Satellitenkonstellation von 360 Sekunden schrittweise auf 15 Sekunden reduziert. Damit ergaben sich 48 verschiedene Kombinationen mit entsprechenden Geometriefaktoren (Tab. 3-2 bis Tab. 3-4). Untersucht wurden ausschließlich Zweifrequenzdaten geodätischer Empfänger, die auf der Messplattform des Geodätischen Instituts der TU Dresden aufgezeichnet worden sind.

Tab. 3-2: *Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software Trimble Total Control*

Beobachtungsdauer [s]	**Satellitenanzahl und (PDOP)**					
	9 (2,5)	8 (2,9)	7 (3,1)	6 (4,1)	5 (6,6)	4 (9,6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
120	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
90	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	-
60	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
45	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
30	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-
15	fixed	fixed	fixed	fixed	-	-

3.8.1 Test der Software *Trimble Total Control Vers. 2.70*

Der erste Test wurde mit der Software *Trimble Total Control* in der Version 2.70 durchgeführt. Nach Herstellerangaben wird hier das Mehrdeutigkeitsproblem bei kinematischen Zweifrequenzdaten mit *On-The-Fly*-Methoden (OTF) gelöst. Das bedeutet, dass keine statische Initialisierung erfolgen muss. Die Initialisierung erfolgt ab fünf Satelliten, deren Signale über ein Mindestintervall hinweg unterbrechungsfrei empfangen worden sein müssen. Die Intervalllänge ist abhängig von der Satellitengeometrie, der Satellitenanzahl und den Mehrwegeeinflüssen.

Das Programm verfügt über drei verschiedene Lösungsstrategien. Die bevorzugte Methode ist das sog. *widelane*-Filterverfahren. Weiter stehen die *narrowlane*- und die geometriefreie Linearkombination zur Verfügung. Nach erfolgter Mehrdeutigkeitslösung kann mit minimal vier Satelliten weiterpositioniert werden. Dabei sollte der PDOP-Faktor kleiner 7 sein.

Es sind verschiedene Einstellmöglichkeiten für Parameter vorhanden, die bei der kinematischen Positionierung benutzt werden. Die Wichtigsten sind:

- Schranke des statistischen Ratio-Tests
- Dreifachdifferenz-Grenzwert für Phasenunterbrechungen
- Standardabweichung der Codemessung
- Standardabweichung der Position
- Wahrscheinlichkeitsgrenzen für χ^2- und Fisher-Test

Der PDOP-Grenzwert für die Berücksichtigung einer Epoche ist vom Anwender leider nicht konfigurierbar. Dieser ist für kinematische Messungen auf den Wert 25 fest eingestellt. Für den Fall, dass bei geringer Satellitenverfügbarkeit eine kurze Signalunterbrechung eines Satelliten auftritt, kann dieser Grenzwert leicht überschritten werden.

Das Programm bietet keine Möglichkeit zur Initialisierung eines kinematischen Segments auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt. Ebenfalls nicht vorhanden ist eine Option zur Auswahl von Zwangspunkten innerhalb eines kinematischen Segments. Jegliche Anpassungen werden erst nach erfolgter Mehrdeutigkeitslösung mittels Koordinatentransformation realisiert. Das wahre Potential vorhandener Passpunkte wird nicht ausgeschöpft.

Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung erfolgte ab 90 Sekunden Beobachtungsdauer mit 5 Satelliten problemlos. Vergleiche der Koordinatenlösungen längerer Messintervalle mit den Sollkoordinaten wiesen keine Veränderungen in der Bestimmung der Mehrdeutigkeiten auf. Tab. 3-2 veranschaulicht dies noch einmal übersichtlich.

Leider war das Programm nicht in der Lage, Phasenlösungen für die verbleibenden Varianten auszugeben. Entweder war keine Lösung berechenbar oder eine berechnete Lösung wurde als ”falsch” identifiziert. Auch entsprechend angepasste Grenzwerte für Rauschen, statistische Tests usw. lieferten keine Ergebnisse.

Die vom Programm tatsächlich ausgegebenen Lösungen konnten als ”korrekt” bewertet werden. Für die Berechnung kürzerer Intervalle mit fünf bzw. vier Satelliten ist die Software jedoch nicht geeignet. Es gibt keine Möglichkeit zur Ausgabe einer *float*-Lösung.

3.8.2 Test der Software *Waypoint GrafNav Vers. 6.02*

Als zweites Programm wurde *GrafNav* der Firma *Waypoint Consulting Inc.* getestet. Die Mehrdeutigkeitslösung erfolgt mit einem sog. *Kinematic Ambiguity Resolution* (KAR) Algorithmus. Dazu sind mindestens 5 Satelliten erforderlich.

Tab. 3-3: *Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software GrafNav. Anmerkungen (a)-(c) siehe Text.*

Beobachtungsdauer	**Satellitenanzahl und (PDOP)**					
[s]	9 (2,5)	8 (2,9)	7 (3,1)	6 (4,1)	5 (6,6)	4 (9,6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
120	fixed	fixed	fixed	fixed	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
90	fixed	fixed	fixed	fixed	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
60	fixed	fixed	fixed	fixed	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
45	fixed	fixed	fixed	fixed	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
30	float	float	float	float$^{(a)}$	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$
15	float	float	float	float$^{(a)}$	float$^{(b)}$	float$^{(c)}$

Das Programm ist auch für erfahrene GPS-Auswerter geeignet, denn es stehen umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten zur Verfügung. Damit ist eine gezielte Beeinflussung der Mehrdeutigkeitslösung möglich. Kinematische Segmente können an beliebigen Stellen mit bekannten Positionen initialisiert werden. Die Prozessierung kann zeitlich vorwärts und rückwärts erfolgen.

Tab. 3-3 zeigt die Ergebnisse des Softwaretests. Dabei sind einige Besonderheiten zu beachten. Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf Ganzzahlen erfolgt unabhängig von der Satellitenanzahl erst ab Segmentlängen von 41 Sekunden. Bei fünf Satelliten konnten entgegen der Aussage des Hilfetextes nur *float*-Lösungen berechnet werden. Dieser Effekt trat auch bei langen Segmenten auf; getestet wurde bis 15 Minuten Datenlänge.

Durch die Möglichkeit, Zwangspositionen an definierten Stellen im kinematischen Segment einzuführen, kann dennoch eine *fixed*-Lösung berechnet werden. Wird bei beliebiger Segmentlänge mit Hilfe der Programmoption *"Ambiguity Fix"* auf einem bekannten Punkt initialisiert, erfolgt für die weiteren Epochen eine korrekte Positionsberechnung.

Damit ist ein Mechanismus gegeben, der auch die Auswertung problematischer Datensätze ermöglicht, sofern externe Zusatzinformationen (Zwangspunkte) eingeführt werden. Es stellte sich die Frage, wie präzise die Koordinaten eines Zwangspunktes sein müssen. Zum Test wurde die Initialisierungsposition systematisch verschlechtert und untersucht, wie sich die Mehrdeutigkeitsfestsetzung verhält. Dazu folgende Anmerkungen.

(a) Durch Einführung einer Initialisierung auf bekanntem Punkt kann auch bei Segmentlängen unter 45 s eine Mehrdeutigkeitsfestsetzung erzwungen werden. Jedoch konvergiert die Lösung unter Umständen nicht zur Sollposition. Liegen Initialisierungs- und Sollposition weiter als 1 m auseinander, erfolgt keine Mehrdeutigkeitsfestsetzung.

(b) Wird eine Initialisierungsposition eingeführt, die nicht weiter als 1 m von der Sollposition entfernt ist, werden die Mehrdeutigkeiten festgesetzt. Dabei konvergiert die Lösung aber nicht zur Sollposition. Der Initialisierungsfehler wirkt als Offset. Aufgrund der kurzen Messdauer und der damit verbundenen geringen Geometrieänderung stellt sich der Offset als konstant dar. Ist die Initialisierungsposition weiter als 1 m von der Sollposition entfernt, gibt das Programm eine *float*-Lösung aus, die dann merklich driftet.

(c) Wird ein kinematisches Segment mit nur vier Satelliten mit bekannter Position initialisiert, erfolgt trotzdem keine Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Jedoch ist die so erhaltene *float*-Lösung genauso präzise wie eine äquivalente *fixed*-Lösung. Die Genauigkeit der Initialisierungsposition beeinflusst direkt die Genauigkeit der Lösung.

3.8.3 Test der Software *Trimble GPSurvey Vers. 2.35*

Ein älteres Softwarepaket ist *GPSurvey* der Fa. *Trimble*. Dieses erlaubt ebenfalls kinematische GPS-Auswertungen, jedoch gibt es Einschränkungen bzgl. der Datenrate. Das interne Datenformat sieht nur eine Dezimalstelle für die Messzeit vor, ermöglicht also maximal 10 Hz Abtastfrequenz. Hinzu kommt, dass aus nicht geklärten Gründen beim Import von Daten im RINEX-Format diese auf 2 Hz ausgedünnt werden. Damit ist das Programm für die Prozessierung von 20 Hz-Daten ungeeignet. Das Programm hat für alle Testdatensätze *fixed*-Lösungen berechnet. Jedoch müssen zwei weitere Bemerkungen zu den Ergebnissen angefügt werden.

(d) Aus nicht identifizierbaren Gründen ist die Positionslösung bei der Nutzung von fünf bzw. sechs Satelliten mit einem konstanten 3D-Offset von 2 cm behaftet.

(e) Bei nur vier sichtbaren Satelliten und einer maximalen Messdauer von unter zwei Minuten wurden die Mehrdeutigkeiten falsch festgesetzt. Dies äußert sich in Positionsablagen von 1,6 m. Das Programm hat mit seinen statistischen Tests nicht erkannt, dass es sich um eine falsche Lösung handelt. Bei so einer geringen Redundanz

Tab. 3-4: *Lösbarkeit von GPS-Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von Satellitenanzahl und Beobachtungsdauer mit der Software GPSurvey. Anmerkungen (d) und (e) siehe Text.*

Beobachtungsdauer [s]	**Satellitenanzahl und (PDOP)**					
	9 (2,5)	8 (2,9)	7 (3,1)	6 (4,1)	5 (6,6)	4 (9,6)
360	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$
120	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$
90	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$
60	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$
45	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$
30	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$
15	fixed	fixed	fixed	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(d)}$	fixed$^{(e)}$

der Daten ist dies nicht überraschend. Es erfordert vielmehr eine erhöhte Aufmerksamkeit des Auswerters. Zur Prüfung der Lösungen sollten zusätzliche unabhängige Kontrollen eingeführt werden.

3.8.4 Schlussfolgerungen aus den Softwaretests und Praxiserfahrungen

Die Untersuchungen haben deutlich gezeigt, dass Standard-Softwareprodukte aus der Vermessungspraxis wenig geeignet sind, kurze kinematische Segmente korrekt zu prozessieren. Die fehlerfreie und zuverlässige Bestimmung der Mehrdeutigkeitsterme für die GPS-Trägerphasenmessung ist aber der Schlüssel zur cm-genauen Positionsbestimmung, wie sie für Untersuchungen zum Skispringen verlangt werden sollte. Gängige Berechnungsalgorithmen gehen davon aus, dass mit sich ändernder Empfänger-Satelliten-Geometrie die Bestimmtheit in den linearisierten Beobachtungsgleichungen zunimmt [Teunissen und Kleusberg 1996]. Eine ausreichend signifikante Geometrieänderung erfolgt i. d. R. aber erst nach einigen hundert Sekunden. Damit sind kurze kinematische Segmente, wie sie beim Skispringen üblich sind, mit geometrischen Methoden nur bedingt auswertbar.

Folgt man den Ausführungen von [Teunissen und Kleusberg 1996], ergeben sich folgende Ansätze zur Stützung der Mehrdeutigkeitslösung:

1. Verlängerung der Messdauer
2. Initialisierung durch Antennentausch
3. statische Initialisierung auf bekanntem Punkt

Zu 1.: Bei ersten Testmessungen mit Skispringern wurde auf eine genügend lange Messdauer der Einzelsegmente geachtet. Dazu mussten die Athleten vor dem Sprung entsprechend lange in der Anlaufspur warten. Das Verfahren hat jedoch einige entscheidende Nachteile, die eine weitere Anwendung in der Praxis nahezu ausschließen. Die Initialisierung ist nur dann erfolgreich, wenn unterbrechungsfrei gemessen werden kann. Da aber viele Athleten intuitiv unmittelbar vor dem Start mit einem Kontrollblick die Skibindungen prüfen, kommt es durch die nickende Kopfbewegung zwangsläufig zur Abschattung einiger Satellitensignale. Damit entstehen Signalunterbrechungen und somit in den Gleichungssystemen neue Mehrdeutigkeitsterme. Die gesamte Initialisierung müsste in diesem Fall wiederholt werden.

Zu 2.: Diese Möglichkeit kann praktisch nicht realisiert werden, da die Referenzstation aufgrund von Abschattungen und Platzmangel nicht auf dem Anlaufturm aufgebaut werden kann.

Zu 3.: Am Beginn des Anlaufs wurde ein Stativ mit einer entsprechenden Halterung für den Helm aufgestellt. Mit Hilfe statischer GPS-Messungen wurden dafür Sollkoordinaten bestimmt. Unmittelbar vor jedem Start wurde der Helm von der Halterung genommen und dem Athleten aufgesetzt. Auch bei dieser Variante gab es keine Erfolgsgarantie, denn schon die rein praktischen Handgriffe des Anlegens der Ausrüstung am Athleten sind nicht zu unterschätzen. Bei laufender Messung muss der Helm so vom Stativ genommen werden, dass keine Signalunterbrechungen, z. B. beim Aufsetzen der Skibrille entstehen.

Die durchgeführten Versuche stellten zwangsläufig massive Eingriffe in den Trainingsablauf der Athleten dar und störten die Konzentrationsphase vor jedem Sprung ganz erheblich. Eine zusätzliche Person musste immer für das Anlegen der Messausrüstung verfügbar sein. Auch die anderen Athleten der Trainingsgruppe wurden abgelenkt und durch die Verzögerungen beeinflusst. Nach wenigen Durchgängen waren einige z.T. sehr sensible Athleten nicht länger bereit, an weiteren Messungen teilzunehmen. Als Alternativlösung wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Lage des Antennenphasenzentrums in der Bewegung direkt und unabhängig von GPS bestimmt werden kann. Im folgenden Kapitel wird darauf genauer eingegangen.

4 Hardware-Entwicklungen für ein GPS-basiertes Messverfahren im Skispringen

Dieses Kapitel beschreibt im ersten Teil den Entwicklungsprozess von zwei GPS-Helmempfängern unter den speziellen Anforderungen des Leistungssports. Die Zentimetergenauigkeit bei der Koordinatenbestimmung kurzer kinematischer GPS-Segmente wird neben der Phasenmessung mit einem Zusatzgerät zur lasergestützten Helmerfassung sichergestellt. In Abschnitt 4.3 wird auf dieses neuartige Prinzip und deren gerätetechnische Realisierung für das Skispringen eingegangen.

4.1 Anforderungen an das Messsystem

Gerade im Skispringen können auch kleinste Veränderungen an der Ausrüstung der Athleten große Auswirkungen auf die Aerodynamik und damit das gesamte Flugverhalten haben. Selbst das beim Springer im Unterbewustsein vorhandene Wissen um mögliche Veränderungen am Material kann bereits dazu führen, dass sich das bei den Untersuchungen gezeigte Bewegungsmuster deutlich von dem bei Wettkämpfen unterscheidet. Im Extremfall werden bei den Messkampagnen nur Sicherheitssprünge gezeigt, die dann nicht den erhofften Erkenntnisgewinn bringen. Da Skispringen nicht ganz ungefährlich ist, sind die Athleten in diesem Punkt verständlicherweise äußerst sensibel.

Deshalb steht als Hauptkriterium im Sinne eines idealen Messsystems die Forderung nach Rückwirkungsfreiheit auf den Athleten und sein Sportgerät. Nur so ist es überhaupt möglich, Verhaltens- und Bewegungsmuster zu erfassen, die denen im Wettkampf nahekommen.

Aus technischer Sicht besteht weiter die Forderung nach adäquater zeitlicher und räumlicher Auflösung der Messungen, damit die Dynamik des Gesamtsystems "Skispringer" bestmöglich erfasst werden kann. Basierend auf den Erfahrungen der Voruntersuchungen sowie auf Gesprächen mit Trainern und Athleten können die Anforderungen an ein GPS-basiertes System zur Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung für den Skisprung wie folgt definiert werden:

- Zentimetergenauigkeit
- hohe zeitliche Auflösung, z. B. 20 Hz und höher
- geringes Gewicht der Ausrüstung am Athleten
- kleines Volumen
- uneingeschränkte Bewegungsfreiheit des Athleten
- schnelle Verfügbarkeit von Ergebnissen
- sportartspezifische Interpretation bzw. Visualisierung der Messungen
- Integration in bestehende Analysesysteme und -konzepte

Da die Anforderungen sehr hoch sind, kommt den konzeptionellen Vorüberlegungen eine besondere Bedeutung zu. Zentimetergenauigkeit bedingt den Einsatz eines GPS-Empfängers, der neben dem C/A-Code auch die Trägerphase messen kann. Die Auswahl konzentriert sich somit auf geodätische Empfänger, die zumeist als Zweifrequenzgeräte erhältlich sind.

Denkbar wäre, die Koordinatenlösungen in Echtzeit mit einem RTK-Verfahren zu bestimmen. Jedoch ist zu befürchten, dass unter den teilweise schwierigen Messbedingungen Signalunterbrechungen auftreten. Deshalb erschien es sinnvoll, die Rohdaten zu speichern und alle *post processing*-Möglichkeiten, wie z. B. die Einführung von Passpunktinformationen auszunutzen (vgl. Kap. 5.1).

4.2 Der GPS-Helmempfänger in den Versionen I und II

4.2.1 GPS-Helm Version I

Eine Marktanalyse kommerzieller geodätischer GPS-Empfänger musste im Jahr 2001 erfolglos beendet werden. Es konnten keine Komplettgeräte gefunden werden, die bzgl. Masse und Volumen den Anforderungen entsprachen. Deshalb wurde die Produktsuche auf sog. *OEM*-Module ausgeweitet. Das sind GPS-Empfänger, die i. d. R. ohne Gehäuse, Stromversorgung, Bedieneinheit und Datenspeicher vom Originalhersteller produziert werden. Systemintegratoren bauen diese Module in ihre eigenen Produkte ein, müssen aber selbst für die fehlenden Komponenten sorgen.

Im Frühjahr 2002 konnte dann das neu in den Verkauf gebrachte GPS-Zweifrequenzempfängermodul *NovAtel OEM4* beschafft werden. Einige technische Daten sind in Tab. 4-1 angegeben. Als Nachteil erwiesen sich die fehlenden Bedienelemente und der nicht vorhandene Datenspeicher. Im Bereich der Automatisierungstechnik wurde daraufhin vergeblich nach geeigneten Lösungen zur Steuerung des Empfängers und zur Datenspeicherung gesucht. Kriterien waren nicht nur Volumen und Masse, sondern auch Energiebedarf, Verfügbarkeit von ausreichend guter Produktdokumentation und nicht zuletzt der Preis.

Abb. 4-1: links: *GPS-Helm Version II mit externem Display zur Anzeige aktueller Systemparameter.* ***rechts:*** *GPS-Helm Version I. Nur die Antenne befindet sich im Helm. Der Empfänger mit Batterie wurde in einer Gürteltasche getragen.*

Tab. 4-1: *Ausgewählte technische Daten der NovAtel OEM4-Module*

	NovAtel OEM4	***NovAtel OEM4-G2L***
Abmessungen (L x B x H)	125 mm x 85 mm x 16 mm	100 mm x 60 mm x 13 mm
Masse	120 g	56 g
Betriebsspannung	6 – 18 V	3,3 V stabilisiert
Leistungsaufnahme	2,7 W	1,8 W
max. Datenrate	20 Hz	20 Hz
Gemeinsamkeiten		
Rohdatenausgabe	seriell, 230400 baud	
Besonderheiten	keine Bedieneinheit, kein Datenspeicher vorhanden	

Diese Schwierigkeiten haben zu der Entscheidung geführt, die notwendige Steuerung und Datenspeicherung in Eigenentwicklung herzustellen. Abb. 4-1 zeigt rechts den fertig aufgebauten Empfänger. Das Gerät kam in den Jahren 2002 und 2003 bei verschiedenen Trainingslehrgängen des deutschen Perspektivkaders im Spezialsprunglauf und der Nordischen Kombination erfolgreich zum Einsatz. Dabei wurden wichtige praktische Erfahrungen gesammelt, die in die Entwicklung der Nachfolgeversion einflossen.

4.2.2 Die Weiterentwicklung: GPS-Helm Version II

Im Frühjahr 2003 konnte der noch kleinere und leichtere GPS-Empfänger *NovAtel OEM4-G2L* beschafft werden, vgl. Tab. 4-1. Durch die geringeren Abmessungen im Vergleich zum Vorgängermodell war eine Komplettintegration in einen Skihelm möglich geworden. Das fertige Gerät ist im linken Teil der Abb. 4-1 dargestellt. Auch hierfür wurden die zur Steuerung und Datenaufzeichnung notwendigen Hardwarekomponenten vom Autor entwickelt und angefertigt, da käuflich zu erwerbende Systeme nicht den Vorgaben an Funktionalität, Größe, Gewicht und Preis entsprachen. Es konnten wesentliche Verbesserungen in Bezug auf das Vorgängermodell erreicht werden.

- Antenne und Empfänger sind nun gemeinsam im Helm untergebracht. Das bisher notwendige Antennenkabel vom Helm zu einer Gürteltasche entfällt. Die Anbringung des Empfängers unter den seit 2001 enger geschnittenen Sprunganzügen [FIS 2000] war nur für Testzwecke akzeptabel.
- Die Kapazität des Datenloggers wurde von vormals 8 MB auf 256 MB vergrößert, um mehrstündige Aufzeichnungen zu gewährleisten. Die bisher notwendigen Datensicherungen innerhalb der Trainingseinheit entfallen.
- Die Stromversorgung für das Gesamtsystem wurde optimiert. Damit konnte eine Gewichteinsparung der Batterien von 30 Prozent realisiert werden. Die Laufzeit des GPS-Helms II mit einer Batterieladung beträgt ca. 4 Stunden.
- Der GPS-Helm II selbst hat keine Kontrollanzeigen. Zur Übertragung des aktuellen Systemzustands wurde ein kleines UHF-Funkmodul eingebaut, das die Informationen zum Handgerät des Betreuers sendet. Der Athlet kann somit ungestört trainieren.

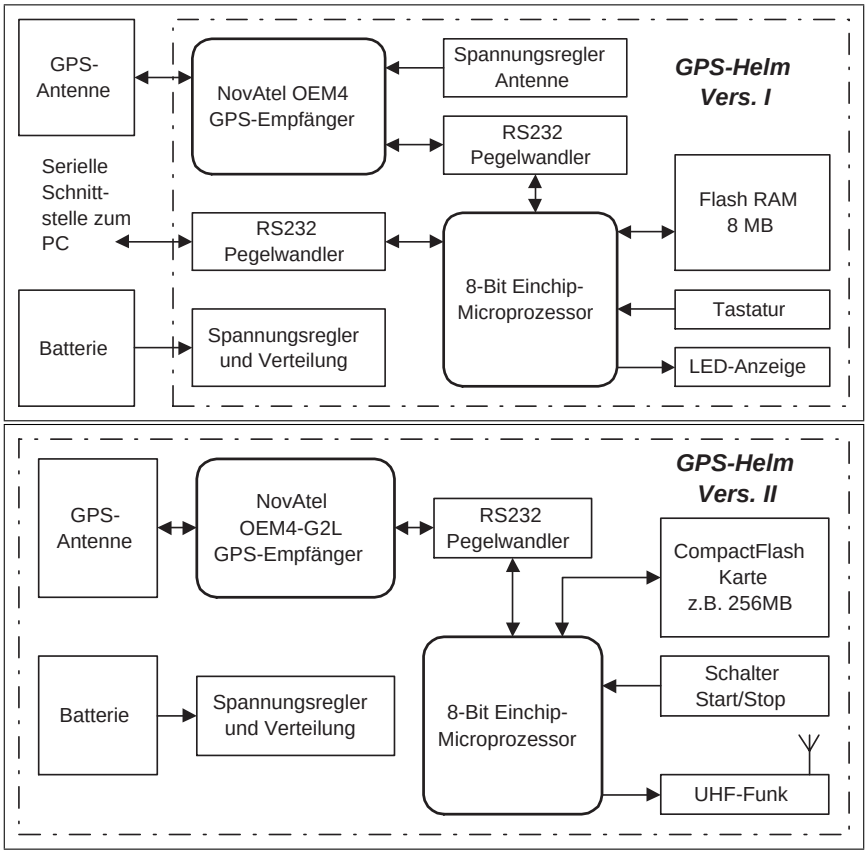

Abb. 4-2: *Blockschaltbilder der GPS-Empfänger Version I (oben) und Version II (unten)*

- Die Integration der Elektronik erfolgte zwischen Innen- und Außenschale des Helms. Somit ist der Helm optisch nicht von anderen Helmen gleichen Typs zu unterscheiden. Die Masse der Messausrüstung konnte bis auf 260 g reduziert werden. Damit ist die Gesamtmasse des Messhelms II (*KED*-Helm + Messeinbauten) vergleichbar mit bisher verwendeten *UVEX*- und *CARRERA*-Helmen.

Abb. 4-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der GPS-Empfänger in den Versionen I und II. Herzstück beider Geräte bildet eine zentrale Steuereinheit, basierend auf einem modernen RISC-Prozessor *ATmega128* der Fa. *Atmel Corp.* [Atmel 2002]. Die Steuereinheit realisiert

- die Ansteuerung des GPS-Empfängermoduls,
- den Datentransfer zur Speichereinheit,
- das Erzeugen/Lesen/Schreiben eines Dateisystems auf dem Speichermedium
- die Ausgabe der aktuellen Systemzustände,
- die Behandlung von Tastaturereignissen,
- die Überwachung der Stromversorgung sowie
- die Erkennung und Behandlung von Ausnahmesituationen.

Nach dem Einschalten werden verschiedene Systeminitialisierungen durchgeführt. Sobald das *OEM*-Modul Bereitschaft signalisiert, werden Grundeinstellungen bzgl. Datenrate, Messmodus, Elevationsmaske usw. vorgenommen.

Betätigt der Nutzer den Startknopf, beginnt die Aufzeichnung der Messwerte. Nach Beendigung der Messung müssen beim GPS-Helm I die Daten seriell zum PC übertragen werden. Dies ist mit einer Maximalgeschwindigkeit von 230 kbaud möglich. Diese Variante war technisch leicht realisierbar, hatte aber den Nachteil, dass die durch die begrenzte Speicherkapazität bedingten Datentransfers Verzögerungen im Trainingsablauf verursachten.

Die Version II arbeitet mit modernen Wechselmedien basierend auf der *CompactFlash*-Speichertechnologie. Diese Speicherkarten sind mittlerweile weit verbreitet, mit Kapazitäten bis 1 GB (2003) erhältlich, haben eine dokumentierte Schnittstelle und können sowohl mit 5 V als auch mit 3,3 V Versorgungsspannung betrieben werden. Die erforderliche Datentransferrate von 230 kbaud stellt für die meisten Speicherkarten kein Problem dar.

Damit die Datenträger in einem *PCMCIA*-Steckplatz eines Laptops oder PCs unkompliziert ausgelesen werden können, muss jedoch eines der gängigen Dateisysteme implementiert werden. Die Komplexität der Steuerungssoftware steigt

dadurch im Vergleich zur Version I erheblich[5]. Die Änderungen an der Hardware hingegen sind gering. Da das Lichtschrankensystem *LLBA16* (vgl. Kap. 4.4) ebenfalls eine Datenspeicherfunktionalität benötigt, lohnte sich die Entwicklung des *CompactFlash*-basierten Datenloggers mit FAT-Dateisystem in jedem Fall.

4.2.3 Stromversorgung

Bei der Batterieauswahl muss neben der Spannung und der Kapazität auf eine möglichst hohe Leistungsdichte und geringes Gewicht geachtet werden. Es sollten keine teuren exotischen Batterietypen eingesetzt werden, damit die Betriebskosten gering bleiben. Einen guten Kompromiss stellen die Lithium-Mangan-Dioxid Batterien dar (z. B. [Energizer 2003]), die vielfach in Fotokameras eingesetzt werden. Der Typ *2CR5* hat eine nominelle Spannung von 6 V und liefert bis zu einer Entladeschlussspannung von 3,5 V ca. 1500 mAh Energie.

Der GPS-Helm I besitzt auf der *OEM4*-Platine einen integrierten Spannungsregler, sodass darauf nicht näher eingegangen wird. Beim Nachfolgemodell ist dieser Regler nicht vorhanden. Es musste eine eigene Stabilisierungsschaltung eingesetzt werden. Analysiert man die Energiebilanz des GPS-Helm II, so ist festzustellen, dass der *OEM4-G2L*-Empfänger mit 1,8 Watt bei 3,3 V stabilisierter Versorgungsspannung [NovAtel 2003] die Hauptlast darstellt. Dank des technischen Fortschritts konnte der Hersteller den Energiebedarf um ein Drittel gegenüber dem Vorgängermodell senken. Die Elektronik zur Empfängersteuerung und Datenspeicherung sowie der UHF-Funksender erreichen zusammen eine Leistungsaufnahme von maximal 100 mW.

Nach dem Gesetz der elektrischen Leistung

$$P = U \cdot I \tag{4-1}$$

mit:

P	elektrische Leistung [W]
U	Spannung [V]
I	Stromstärke [A]

ergibt sich bei 3,3 V eine Stromstärke von immerhin 575 mA. Damit die Energie der Batterie bestmöglich ausgenutzt werden kann, ist zur Spannungsstabilisierung der Einsatz eines Schaltreglers dem eines Linearreglers vorzuziehen.

Linearregler stellen eine geregelte ohmsche Last dar. Die Stromstärke im Primärkreis entspricht im Wesentlichen der im Sekundärkreis. Die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung wird direkt in Wärme umgesetzt. Die Leistungsaufnahme aus einer 6 V-Batterie würde im Beispiel

$$6\ V \cdot 0,575\ A = 3,45\ W \tag{4-2}$$

betragen. Dabei würde die Differenz von ca. 1,5 W ausschließlich zur Aufheizung des Helms beitragen. Eine Lithiumbatterie des Typs *2CR5* wäre somit in nur 2,5 Stunden entladen.

Die schaltungstechnisch komplexeren Schaltregler hingegen bieten den Vorteil, dass die Spannungstransformation bei einem sehr hohen Wirkungsgrad stattfindet. Die mechanischen Abmessungen moderner Schaltregler sind sehr klein. Da keine nennenswerte Verlustleistung entsteht, werden auch keine Kühlkörper benötigt. Allgemein gilt

$$P_{ges} = \frac{P_{sek}}{\eta} \tag{4-3}$$

mit:

P_{ges}	elektrische Gesamtleistung [W]
P_{sek}	elektrische Leistung im Sekundärkreis [W]
η	Wirkungsgrad.

Für den ausgewählten Schaltregler wird ein Wirkungsgrad von 92% angegeben [Traco 2001]. Im Beispiel ergibt sich damit eine Stromstärke im Primärkreis von maximal 345 mA. Die Batteriehaltbarkeit erhöht sich somit von 2,5 auf ca. 4 Stunden.

Die Batterie ist im Helm neben dem GPS-Empfänger eingebaut. Die Wärmeentwicklung des Empfängers wird ausgenutzt, um bei kaltem Wetter ein Unterkühlen der Batterie zu vermeiden. Je niedriger die Temperatur der Batterie ist, desto weniger Energie kann ihr entnommen werden.

[5] Alternativ wäre die Programmierung eines Linux-/Windows-Treibers für ein eigenes einfacheres Dateisystem möglich. Dies verlagert den Programmieraufwand aber nur an eine andere Stelle. Die Gesamtlösung wäre unflexibler nutzbar.

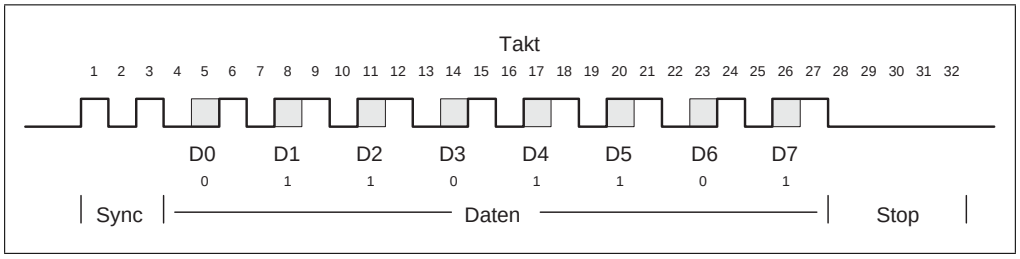

Abb. 4-3: *Impulsbreitencodierung eines Datenbytes zur drahtlosen Übertragung*

4.2.4 UHF-Datenkanal zur Echtzeit-Systemüberwachung

Aus praktischen Gründen erschien es nicht sinnvoll, ein Anzeigemodul direkt in den GPS-Helm II zu integrieren. Die äußeren Faktoren, wie z. B. Wettereinflüsse oder Sturzbelastungen würden zum baldigen Defekt führen. Deshalb wurde ein externes Handgerät mit einer vierzeiligen LCD-Anzeige konstruiert. Aktuelle Satellitenanzahl, Satellitengeometriefaktor, Uhrzeit, Batteriekapazität, Speicherkapazität und andere Statusinformationen gelangen drahtlos über einen Datenkanal im ISM-Band vom GPS-Helm II zum Display. Damit ist eine komfortable Lösung zur Kontrolle der Systemzustände gegeben.

Als Sender und Empfänger im Helm bzw. Anzeigegerät wurden fertig aufgebaute Module der Fa. *SVS Nachrichtentechnik* eingesetzt. Auswahlkriterien waren geringes Gewicht, passender Spannungsbereich sowie geringe Leistungsaufnahme. Die Module enthalten jedoch keine eigenen Datencodierungsfunktionalitäten. Wird am Signaleingang *high*-Pegel angelegt, generiert das Funkmodul eine Trägerfrequenz mit maximaler Amplitude. Binärzustande können also nur durch Variation der Impulsbreite oder einer zeitlichen Impulsverschiebung codiert werden.

Ein Standardverfahren dafür ist die Manchester-Codierung. Sie wird überall dort eingesetzt, wo der/die Empfänger Daten asynchron zum Sender empfangen. Die binären Zustände werden durch steigende bzw. fallende Signalflanken an bestimmten Stellen im Datentelegramm codiert. Der dem Empfänger nachgeschaltete Prozessor tastet das Empfangssignal mit ausreichend hoher Frequenz ab. Mit Hilfe einer digitalen Phasenverfolgungsschleife (*DPLL*) werden die Signalflanken erkannt und der Takt des Signals rekonstruiert. Damit können Variationen in der Modulationsfrequenz ausgeglichen werden. Diese Technik wird z. B. in Magnetkartenlesegeräten eingesetzt, um den Effekt unterschiedlich schnellen Hindurchziehens der Karte zu kompensieren.

Für den GPS-Helm II wurde ein leicht modifiziertes und daher einfacher zu implementierendes Codierungsverfahren gewählt, vgl. Abb. 4-3. Jedes zu sendende Byte beginnt mit zwei Synchronisationsbits. Dann folgen die Datenbits. Das Ende wird durch eine bestimmte Anzahl von Stopbits codiert. Jedes Datenbit wird durch ein führendes ”0”-Bit und ein nachfolgendes ”1”-Bit eingehüllt. Somit sind 32 Taktzyklen zur Übertragung eines Bytes nötig. Das ergibt zwar ein recht ungünstiges Nutzlastverhältnis von 4:1, jedoch ist die programmtechnische Umsetzung deutlich einfacher als bei *DPLL*-Algorithmen. Bei der Anwendung im GPS-Helm II dient der Datenkanal ausschließlich zur Übertragung von Informationen zum Nutzer. Dafür werden keine hohen Datenraten benötigt.

Zu Beginn der Übertragung erwartet der Funkempfänger im Anzeigegerät die zwei Synchronisationsbits. Sind diese korrekt decodiert worden, befindet sich der Algorithmus im synchronisierten Zustand. Die nächsten Impulse werden daraufhin als Daten interpretiert. Die abschließenden Stopbits bewirken, dass der Empfangsalgorithmus in den Anfangszustand zurückversetzt wird.

Um die Datensicherheit bei der Signalübertragung zu gewährleisten, vergleicht der Algorithmus in den Takten 4, 6, 7, 9, usw. das tatsächlich empfangene Bit mit dem jeweiligen Sollwert der einhüllenden Bits. Gibt es eine Differenz, ist die Synchronisation verloren gegangen. Ursache dafür sind zumeist Funkstörungen aus dem nahen Umfeld. Die Datenbits selbst werden durch ein angefügtes Paritätsbit überprüft. Werden *ASCII*-Daten übertragen, so sind die darstellbaren Zeichen mit 7 Bit codiert. Bit 8 ist dann die Paritätsinformation. Damit ist ein zuverlässiger Rahmen für die Übertragung der Nutzbits gegeben.

Dieses einfache Verfahren funktioniert nur deshalb stabil, da im konkreten Anwendungsfall folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Prozessoren auf Sende- und Empfangsseite sind quarzgenau getaktet.
- Die Impulsbreite ist genügend groß.
- Die Impulsbreite ist konstant und dem Empfängeralgorithmus bekannt.

Um mit der beschriebenen Bytecodierung Zeichen an bestimmten Stellen in einer LCD-Anzeige zu erzeugen, wurde ein weiteres Übertragungsprotokoll aufgesetzt. Jede zu übertragende Nachricht beginnt mit einem definierten Startbyte aus dem Wertebereich der nicht darstellbaren Zeichen. Die Empfangsroutine prüft jedes fehlerfrei empfangene Byte auf

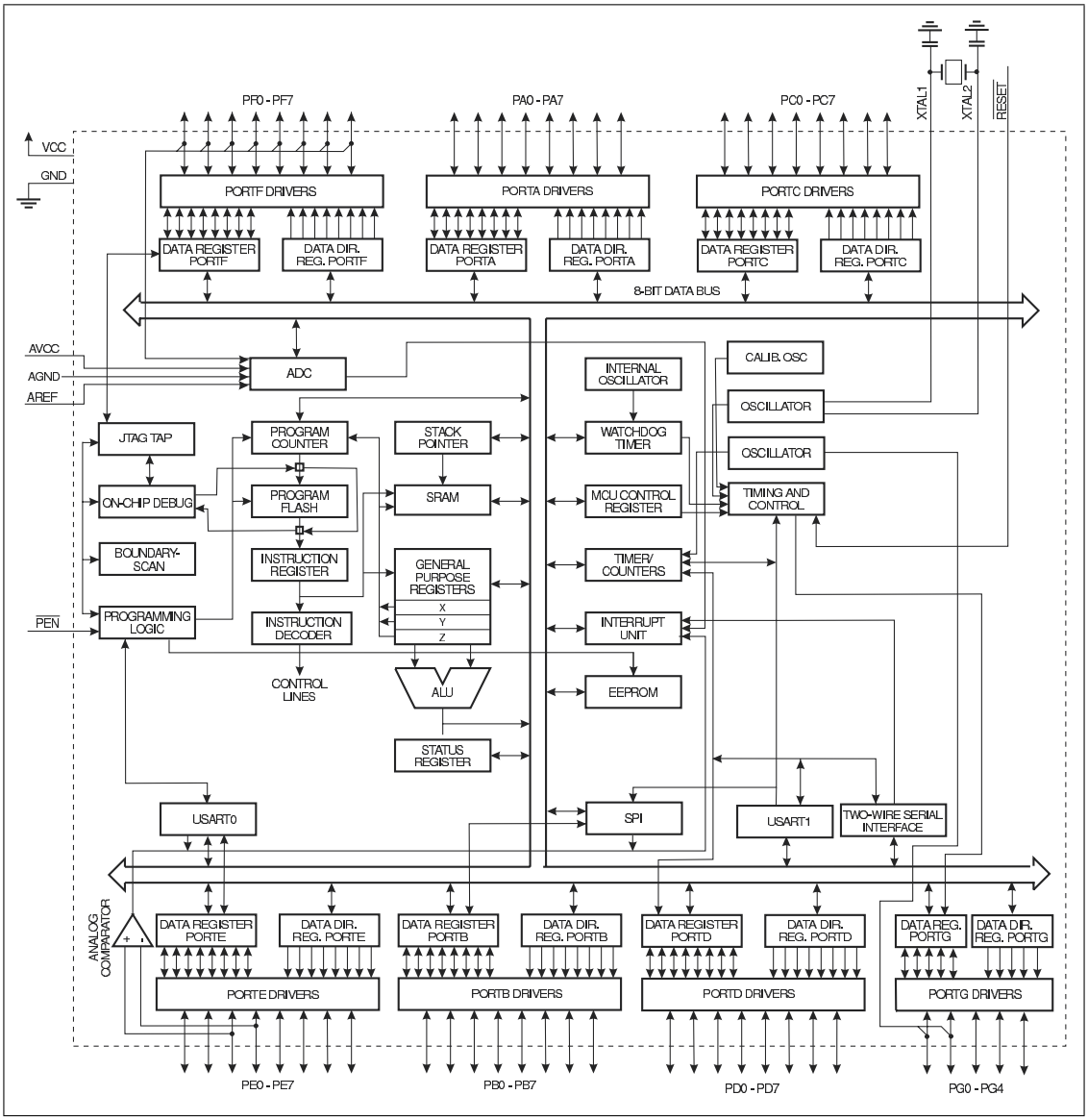

Abb. 4-4: *Blockdiagramm des RISC-Microprozessors ATmega128, Quelle: [Atmel 2002]*

diesen Wert und startet ggf. mit der Speicherung des Datenstroms in einem Pufferspeicher. Per Konvention enthält jede Nachricht eine konstante Anzahl Zeichen. Jeder Speicherplatz im Puffer ist genau einem Zeichen in der Anzeige zugeordnet. Der Empfänger kann nun durch einfaches Mitzählen der empfangenen Zeichen das Nachrichtenende erkennen. Sind alle Bytes einer Nachricht empfangen worden, transferiert der Prozessor den Pufferinhalt in die angeschlossene LCD-Anzeige. Mit diesem Mechanismus wird erreicht, dass auch bei Empfangsstörungen eine Selbstsynchronisation zwischen gesendeten Nachrichtenbytes und zugehörigem Platz im Display stattfindet.

4.2.5 Der Atmel ATmega128(L) RISC-Prozessor

Der für die zentralen Steuerungsaufgaben eingesetzte Prozessor gehört zur Familie der *Reduced Instruction Set Computing (RISC)*-Prozessoren. Dank der relativ kleinen Anzahl wenig komplexer Befehle können diese intern direkt verdrahtet werden. Dadurch entfällt die sonst notwendige Umsetzung in Micro-Code. Beim *ATmega128* sind 133 Befehle verfügbar, die zumeist in ein bis zwei Taktzyklen abgearbeitet werden.

Um die Parallelität der Befehlsverarbeitung und damit die Leistungsfähigkeit des Prozessors zu erhöhen, sind die Baugruppen nach dem Prinzip der *Harvard*-Architektur miteinander verbunden. Programmcode und Daten werden über getrennte Bussysteme aus separaten Programm- bzw. Datenspeicherbereichen transferiert. Während der Verarbeitung der Daten eines Befehls kann schon der nächste Befehl vom Speicher in das Befehlsregister geladen werden.

Abb. 4-4 zeigt den Aufbau des 8-Bit Prozessors. In einem 16mm x 16mm großen Gehäuse mit 64 Anschlüssen befinden sich die verschiedensten Baugruppen. Besonders hervorzuheben sind die zwei voneinander unabhängig arbeiten-

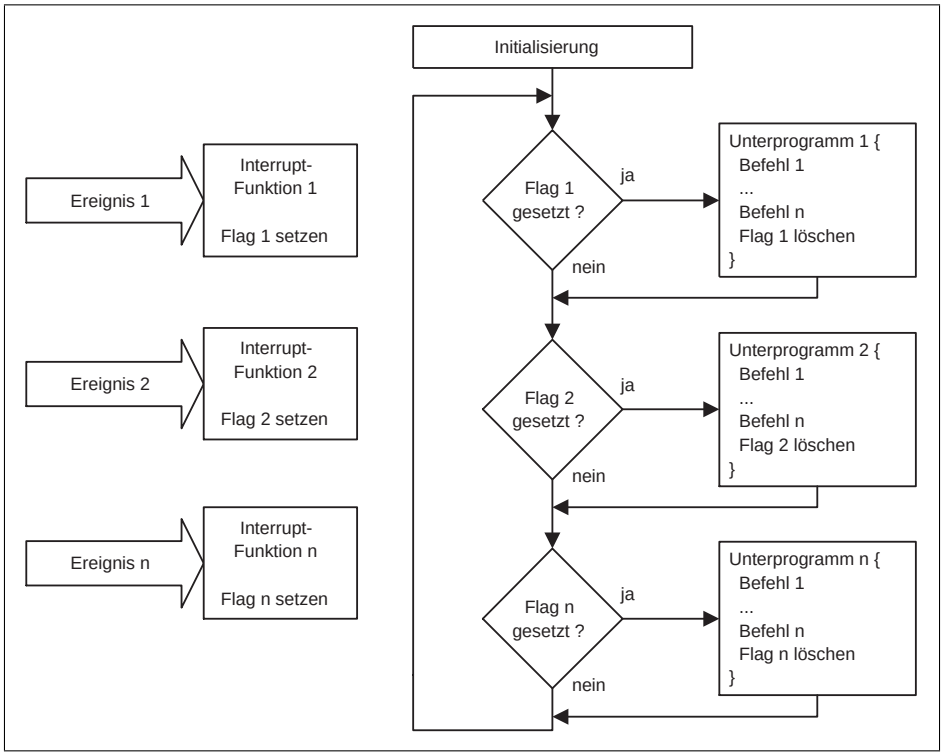

Abb. 4-5: *Prinzip der ereignisorientierten Programmsteuerung mit Zustandsvariablen und gleichverteilter Prozesspriorität (State Machine)*

den seriellen Schnittstellen. Damit lässt sich der GPS-Empfänger in sehr komfortabler Weise ansteuern. Der Prozessor besitzt je zwei 8-bit und zwei 16-bit Zeitgeber/Zähler, die dank ihrer asynchronen Arbeitsweise zur zeitlichen Ablaufsteuerung genutzt werden können. Außerdem sind Analog-Digital Wandler verfügbar. Mit minimalem Schaltungsaufwand kann so die Überwachung der Batteriespannung realisiert werden.

Die 53 bidirektionalen Ein- und Ausgänge des Prozessors sind zu sog. Ports gruppiert. Über diese kann mit den externen Komponenten der Schaltung kommuniziert werden. Einige Anschlüsse sind intern mit dem Interruptsystem des Prozessors verbunden. Der Start/Stop-Schalter z. B. nutzt diesen Mechanismus, um durch Änderung des elektrischen Signalpegels an einem Signaleingang eine entsprechende Routine zu starten. Die *CompactFlash*-Karte ist über 8 Daten-, 3 Adress- und 5 Steuerleitungen mit dem Prozessor verbunden.

Der Prozessortakt wird intern oder extern durch Schwingquarz bzw. Resonator erzeugt. Der *ATmega128* kann bei 4,5 – 5,5 V bis 16 MHz betrieben werden. Die Niedrigspannungsvariante *ATmega128L* arbeitet nur bis 8 MHz, dafür aber in einem Spannungsbereich von 2,7 – 5,5 V.

Speicherbereiche

Im Prozessor sind verschiedene Speicher unterschiedlicher Technologie enthalten. Mit 128 kB ist der nichtflüchtige Programmspeicher der größte Bereich. Hier wird eine Abfolge von Maschinenbefehlen als Programm gespeichert. Es besteht die Möglichkeit, in diesem Bereich statische Daten vorzuhalten, auf die vom Programm aus lesend zugegriffen werden kann. Das sind i. d. R. Konstanten, wie z. B. Steuerbefehle für den GPS-Empfänger oder Textmeldungen an den Nutzer. Der Speicher basiert auf der *Flash*-Technologie und wird von außen während eines separaten Programmiervorgangs beschrieben.

Als Arbeitspeicher sind intern 4 kB *Static Random Access Memory (SRAM)* vorhanden. Hier kann lesend und schreibend zugegriffen werden, jedoch sind die Daten nach einem Reset gelöscht. Optional kann der Speicher durch externe Module auf 64 kB vergrößert werden. Dadurch werden bis zu 19 Ein-/Ausgänge des Prozessors belegt. Dies jedoch kostet nicht nur Geld für Speicherschaltkreis und Adresszwischenspeicher, sondern auch Platz auf der Platine. Für den GPS-Helm II wurde ein optimiertes Speichermanagement erarbeitet, das mit den vorhandenen 4 kB auskommt.

Ein dritter Bereich, ebenfalls 4 kB groß, ist der *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM)*-Speicher. Hier kann ein Programm Daten ablegen, die nach einem Reset noch zur Verfügung stehen sollen. In der GPS-Helm-Version I wurde z. B. in diesem Bereich gespeichert, wieviele Rohdaten aufgezeichnet wurden. Beim Auslesen der Daten konnte so ganz leicht die Anzahl der zu übertragenden Bytes bestimmt werden. In der Version II wird hiervon kein Gebrauch gemacht, da solche Informationen im Dateisystem auf der *CompactFlash*-Karte gespeichert sind.

4.2.6 Algorithmen und softwaretechnische Aspekte der Systemsteuerung

Die *RISC*-Prozessoren der Fa. *Atmel* können u. a. in den Sprachen *AVR*-Assembler und in *C* programmiert werden. Beide Sprachen haben Vor- und Nachteile. So sind die Quelltexte in Assembler deutlich länger und schwerer lesbar als in *C*, jedoch können zeitkritische Verarbeitungsschritte einfacher implementiert werden. In jedem Fall ist eine genaue Planung der Softwarefunktionalitäten notwendig, da nur eine begrenzte Speicherkapazität im *RAM* vorhanden ist und nur relativ geringe Taktraten realisiert werden können.

Ablaufsteuerung nach dem Prinzip der State Machine

Damit die Steuerung in Echtzeit auf Ereignisse reagieren kann, wird ein spezieller Mechanismus eingesetzt, der im englischen Sprachgebrauch mit *State Machine* bezeichnet wird. Jedes Ereignis kann eine Unterbrechungsanforderung (Interrupt) an den Prozessor senden. Dieser startet daraufhin eine durch den Programmierer festgelegte Routine zur Behandlung des Ereignisses (Interruptroutine). Nachdem die Funktion ihre spezielle Aufgabe abgeschlossen hat, kehrt die Programmsteuerung zu der Stelle im Hauptprogramm zurück, an der die Abarbeitung unterbrochen wurde.

Das Hauptprogramm führt nach dem Einschalten alle notwendigen Initialisierungen des Prozessors, der Speicherbereiche und Variablen sowie der angeschlossenen Hardware-Komponenten durch. Anschließend tritt es in eine Endlosschleife ein, vgl. Abb. 4-5. Bei jedem Schleifendurchlauf werden die Zustandsregister auf spezielle Bits geprüft. Jedem Bit ist ein Unterprogramm eindeutig zugeordnet. Bei entsprechendem Testergebnis verzweigt die Steuerung dorthin. Damit dieser Interrupt-Mechanismus funktioniert, bedarf es einiger Grundregeln.

- Alle Programme mit Ausnahme der Interruptfunktionen müssen so gestaltet sein, dass sie jederzeit unterbrochen werden können.
- Sind Unterbrechungen in bestimmten Phasen der Programmabarbeitung nicht zulässig, dürfen Interrupts nur für wenige Taktzyklen deaktiviert werden, um einen Überlauf von Unterbrechungsanforderungen zu vermeiden.
- Interruptbehandlungsroutinen müssen kurz sein. Es sollten nur die Befehle ausgeführt werden, die nicht durch das Hauptprogramm abgearbeitet werden können.
- Interruptroutinen signalisieren den Wunsch nach Bearbeitung einzelner Aufgaben durch Setzen von Zustandsbits in Zustandsregistern.
- Nach erfolgreicher Bearbeitung einzelner Aufgaben löscht das verantwortliche Teilprogramm das Zustandsbit.

Diese einfache Form der Steuerung verzichtet auf eine Prioritätsverwaltung. Komplexere Systeme implementieren Mechanismen, um Aufgaben mit Echtzeitanforderungen prozentual mehr Prozessorzeit zuzuordnen als solchen, die geringere Anforderungen an eine zeitnahe Ausführung haben.

Zeitplanung

Als wichtigste Bedingung gilt, dass der Prozessor in der Lage sein muss, alle in der Summe anstehenden Aufgaben zeitlich bewältigen zu können. Dementsprechend ist eine präzise Zeitplanung erforderlich. Die Auswahl der Quarzfrequenz und damit der Rechengeschwindigkeit ist ein Kompromiss zwischen benötigter Rechenkapazität und Stromverbrauch. Je höher die Frequenz ist, desto mehr Befehle pro Zeiteinheit können verarbeitet werden, jedoch steigt auch der Energiebedarf im Prozessor.

Im Beispiel des GPS-Helms II ergibt sich folgender Zeitplan. Um die Rohdaten bei 20 Hz Datenrate ohne Überlauf an der seriellen Schnittstelle empfangen zu können, muss eine Schnittstellengeschwindigkeit von 230,4 kbaud gewählt werden. Zur Realisierung diese Schnittstellengeschwindigkeit im Prozessor kommen nur spezielle Quarzfrequenzen in Betracht, da die Hardware den niedrigeren Takt durch Frequenzteilung mit ganzem Teilungsfaktor nach folgender Berechnungsvorschrift erzeugt [Atmel 2002].

$$Baudrate = \frac{f_{Quarz}}{16(Teiler + 1)} \tag{4-4}$$

mit:

f_{Quarz} Grundfrequenz eines Schwingquarzes [Hz]

Für den eingesetzten Prozessor *ATmega128L* beträgt die maximal zulässige Frequenz, bei der ein fehlerfreier Takt an der Schnittstelle erzeugt werden kann, exakt 7,3728 MHz. Der Teilungsfaktor ergibt sich zu 1. Bei dieser Datenrate wird aller 43 μs ein Byte an der Schnittstelle eintreffen. Der Prozessor hat nun zur Weiterverarbeitung 320 Taktzyklen Zeit. Anders formuliert: aller 43 μs wird das laufende Programm zur Abarbeitung einer wichtigen Aufgabe kurz unterbrochen.

Datenpuffer und sektorbasierter Datentransfer

Da die anstehenden Aufgaben i. d. R. nicht in 320 Taktzyklen abzuarbeiten sind, muss der serielle Datenstrom im *SRAM* gepuffert werden. Ein weiterer Grund für die Pufferung ist, dass die kleinste adressierbare Einheit in einer *CompactFlash*-Karte der Sektor (512 Byte) ist. Nun hat aber der Prozessor nur 4 kB Speicher, wovon einige hundert Byte für andere Variablen benötigt werden. Es kann also nur in eng begrenztem Umfang zwischengespeichert werden.

Der Mechanismus des sektorweisen Datentransfers zur Speicherkarte funktioniert wie folgt. Nach dem Initialisieren der Karte wird die Adresse des gewünschten Sektors übermittelt. Es folgt ein entsprechender Befehl, der den Schreibzugriff auf diesen Sektor signalisiert. Ein weiterer Parameter enthält die Anzahl von zu transferierenden Sektoren, gerechnet ab dem eingestellten Startsektor. So können 1 bis 256 Sektoren hintereinander als sog. *burst* geschrieben werden. Der *burst*-Modus ist die schnellste Zugriffsart, da die Zeiten für neuerliche Initialisierung, Adressierung, usw. eingespart werden [SanDisk 2002]. Die Speicherkarte signalisiert nun die Bereitschaft zur Entgegennahme der Daten, die daraufhin Byte für Byte synchron zu einem Taktsignal gesendet werden. Während die Daten in die eigentlichen Speicherzellen abgelegt werden, signalisiert die Karte den Zustand *busy* und ist in dieser Zeit nicht in der Lage, weitere Befehle oder Daten entgegenzunehmen. Dieser Zyklus wiederholt sich, bis alle Daten geschrieben sind. Lesezugriffe funktionieren nach dem gleichen Prinzip, jedoch sind die *busy*-Zeiten i. d. R. deutlich geringer.

Um 512 Byte zum Speicher zu übertragen, benötigt der Prozessor ca. 1,4 ms. In dieser Zeit treffen im ungünstigsten Fall bis zu 33 neue Bytes über die serielle Schnittstelle ein, die im Pufferspeicher zwischengelagert werden müssen. Ein Überschreiben der ersten Bytes im Pufferspeicher verbietet sich, denn im Fall eines Schreibfehlers auf der *CompactFlash*-Karte müsste der Pufferinhalt ggf. erneut übertragen werden, wäre aber bereits mit neuen Daten überschrieben worden. Die softwaretechnische Lösung sieht zwei Speicherbereiche vor, die als eine Art Ringpuffer funktionieren. Ein Bereich dient zur Entgegennahme aktueller Daten von der Schnittstelle. Aus dem anderen Bereich können zeitgleich Daten zur *CompactFlash*-Karte transferiert werden. Ist der erste Speicherbereich gefüllt, wechselt die Zuordnung und der Transferalgorithmus bekommt seine Daten dann aus dem ersten Pufferbereich.

Die maximal mögliche Datenrate ergibt sich allgemein aus der Initialisierungszeit für einen Schreibvorgang, der Sektorprogrammierzeit der *CompactFlash*-Karte, der Anzahl zu schreibender Sektoren (entspricht der verfügbaren Pufferspeichergröße), der Sektorgröße sowie der Anzahl an Protokollbits.

$$Baudrate < \frac{n \cdot BpS \cdot BpB}{t_{Init} + n \cdot t_s} \tag{4-5}$$

mit:

t_{Init}	Initialisierungszeit [s]
n	Anzahl zu übertragender Sektoren (1 bis 256)
BpS	Byte pro Sektor, i. d. R. 512
BpB	Daten- und Protokollbits pro Byte, Wert ”10” bei Format ”8,n,1”
t_s	Sektorprogrammierzeit [s]

Unbekannt ist dabei die tatsächliche Sektorprogrammierzeit. Aus Marketinggründen geben die Hersteller der verwendeten *CompactFlash*-Karten keine Sektorprogrammierzeiten, sondern lieber die wohlklingenden maximal erreichbaren Datenraten im *burst*-Modus an. Das bedeutet, dass zwar bis zu 256 Sektoren (128 kB) in sehr hoher Geschwindigkeit zur Karte übertragen werden können. Die Datenraten für kontinuierliches Schreiben sind aber deutlich geringer.

Die eigentliche Frage ist, für welchen Zeitraum nach dem reinen Datentransfer die Karte den Zustand *busy* signalisiert. Denn in dieser Zeit muss der Pufferspeicher im Prozessor die Daten aufnehmen können. Deshalb wurden eigene Messungen zur Ermittlung des Zeitbedarfs in Abhängigkeit der Sektoranzahl durchgeführt. Teilweise sind karteninterne Pufferspeicher vorhanden, die eine gewisse Anzahl an Sektoren aufnehmen können. So wurde bei einer Karte festgestellt, dass die Programmierzeiten für ein bis vier Sektoren im *burst*-Modus identisch waren. Bei kontinuierlichem Schreiben waren in unregelmäßigen Abständen dann doch größere Werte bis hin zu 100 ms(!) zu verzeichnen. Das deutet darauf hin, dass auch der karteninterne Sektorpuffer von Zeit zu Zeit vollständig belegt ist.

Ungepufferte (preiswerte) Karten waren an sehr großen Schwankungen der Sektorprogrammierzeiten sofort zu erkennen. Dies ging im Einzelfall bis hin zu 50 ms pro Einzelsektor. Es gilt also festzuhalten, dass der Zeitbedarf einer Karte zur Speicherung eines Sektors nicht konstant und zudem stark abhängig vom Preis der Karte ist. Für kontinuierliches Schreiben mit hohen Datenraten sollte ein möglichst großer Pufferspeicher im System verfügbar sein.

Dateisystem

Damit die Speicherkarte in einem *PCMCIA*-Schacht eines Rechners ohne spezielle Treibersoftware gelesen werden kann, müssen die Daten als Dateien in einem allgemein lesbaren Format gespeichert werden. Zu diesem Zweck wurde in der Steuerung des Datenloggers das *FAT16*-Dateisystem implementiert. Die kleinste adressierbare Einheit dieses

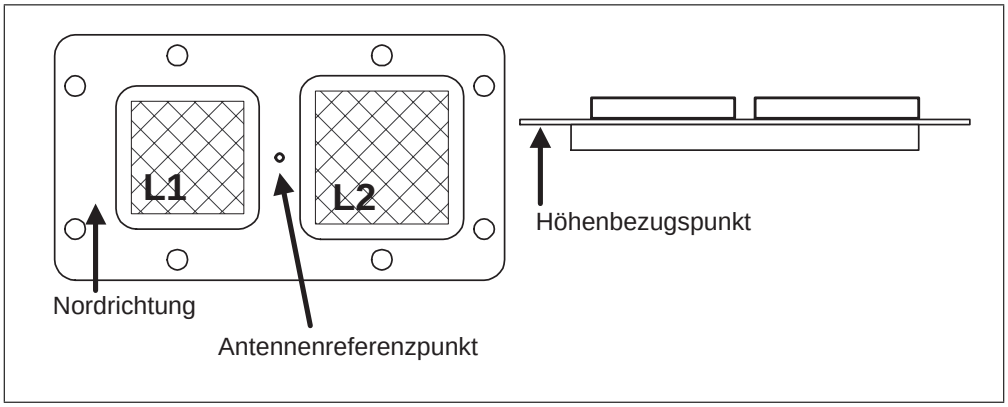

Abb. 4-6: *Aufbau der eingesetzten Zweifrequenzantenne AeroAntenna AT2775-102*

Dateisystems sind sog. Cluster aus 2, 4, 8, 16, ... Sektoren. Dateien bestehen aus einer Aneinanderreihung von einzelnen Clustern. In einer Tabelle[6] (*File Allocation Table (FAT)*) wird die Zuordnung von Clustern zu Dateien verwaltet. Für jede Datei wird unter anderem ein Name, die Nummer des Startclusters sowie die tatsächliche Dateigröße in einem Dateiverzeichnis festgehalten.

Bei der GPS-Messung liegen die Daten verständlicherweise noch nicht vollständig vor, sodass die Erzeugung einer Datei sequentiell erfolgen muss. Das Anlegen einer neuen, noch leeren Datei mit automatisch generiertem Namen erfolgt im Moment der Betätigung des Start-Schalters. Während der laufenden Messung werden die Daten Sektor für Sektor in vorab ermittelte unbelegte Cluster transferiert. Die Anzahl geschriebener Bytes wird gezählt, damit der Dateieintrag bei Betätigung der Stop-Taste vervollständigt werden kann. In der Dateizuordnungstabelle erhält das zuletzt eingetragene Cluster eine Dateiende-Markierung.

Diese in der Summe recht komplexen Verwaltungsaufgaben rund um die Datenspeicherung müssen programmtechnisch sehr effizient gestaltet sein. Wäre ausreichend Hauptspeicher vorhanden, könnten eine Kopie der Dateizuordnungstabelle sowie die aktuellen Einträge aus dem Hauptverzeichnis im *RAM* gespeichert und während der Messung bearbeitet werden. Nach beendeter Messung würde das Dateisystem auf der Karte dann mit einigen wenigen Schreibzugriffen aktualisiert werden. Leider ist für dieses Vorgehen nicht genügend *RAM* verfügbar. Der Prozessor ist nahe seiner Leistungsgrenze, wenn man von der Möglichkeit absieht, externen *RAM* einzusetzen.

Deshalb muss die dateisystemabhängige Verwaltungsarbeit sequentiell erfolgen. Nur bei Bedarf werden einzelne FAT-Sektoren mit den Verwaltungsinformationen gelesen bzw. geschrieben. Damit die dafür notwendige Rechenzeit zur Verfügung steht, muss der Datenpuffer für die ankommenden Messwerte so groß wie möglich sein. Dem sind aber Grenzen gesetzt, denn neben den 512 Bytes für einen zu bearbeitenden Sektor wird der Speicher auch für andere Teile des Steuerungsprogramms benötigt. Es verbleiben also rund 2 kB für Pufferzwecke.

Im GPS-Helm Version I wurden 8 MB *Flash*-Speicher fest auf der Platine eingebaut. Bei dieser Variante war es deshalb nicht erforderlich, ein allgemein übliches Dateisystem zu implementieren, da der Speicher in jedem Fall vom selben Prozessor ausgelesen wird. Die Verwaltung von den zu einem Datensatz gehörenden Bytes vereinfacht sich deshalb enorm. Die notwendigen Informationen werden im nichtflüchtigen *EEPROM*-Speicher abgelegt und sind nach erneutem Einschalten des Geräts wieder verfügbar. Begünstigend kommt hinzu, dass bei den eingesetzten Speicherbausteinen byte- und nicht sektorweise adressiert und geschrieben/gelesen wird. Der Mehraufwand für die dazu notwendigen 23 Adressleitungen ist gering. Zum stabilen Betrieb wird nur ein ganz geringer Pufferspeicher von wenigen Bytes benötigt, denn die Byte-Programmierzeiten liegen um ein Vielfaches unterhalb der Datenempfangsrate.

4.2.7 Die GPS-Helmantenne

Das Angebot an geeigneten GPS-Antennen war sehr begrenzt, da viele Geräte durch ihre große Masse für einen Helmeinbau nicht geeignet sind. Eingesetzt wurde das Modell *AT2775-102* der Fa. *AreoAntenna*. Diese Antenne ist ohne Gehäuse ca. 65 g schwer. Bei vielen geodätischen Antennen ist ein mittig montiertes symmetrisches Antennenelement vorhanden. Dieses ist für den Empfang beider GPS-Trägerfrequenzen ausgelegt.

Die hier eingesetzte Antenne ist jedoch etwas anders aufgebaut, vgl. Abb. 4-6. Für die GPS-Frequenzen L1 und L2 sind getrennte Patchelemente nebeneinander auf dem Grundträger montiert. Die Abmessungen sind deutlich kleiner als bei geodätischen Antennen. Sie ähneln mehr den im Automobilbereich eingesetzten Einfrequenzmodellen.

[6] Aus Gründen der Datensicherheit befinden sich i. d. R. zwei identische Tabellen auf dem Speichermedium.

Tab. 4-2: *Mittlere Ablage des Antennenphasenzentrums in Metern*

Komponente	L1	L2	L0
Nord	0,003	-0,004	0,014
Ost	0,007	-0,009	0,032
Höhe	0,047	0,075	0,004

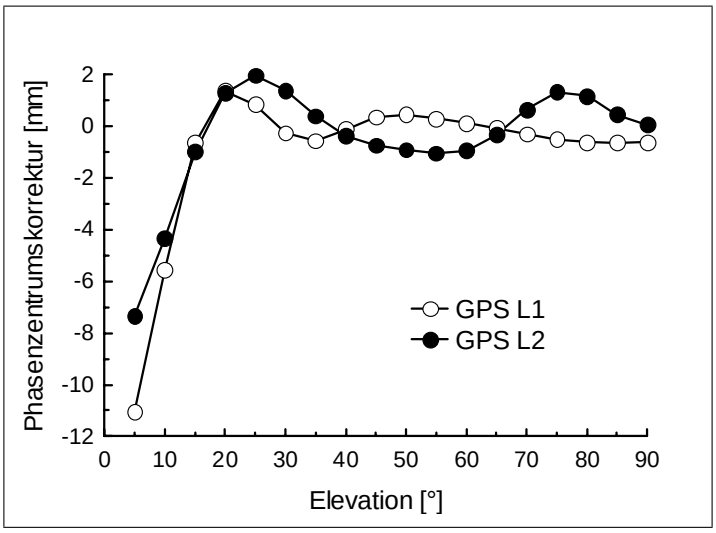

Abb. 4-7: *Elevationsabhängige Korrekturen des Antennenphasenzentrums der AeroAntenna-Antenne*

Antennenkalibrierung

Aus statischen GPS-Messungen wurden die in Tab. 4-2 dargestellten Phasenzentren der Antenne berechnet. Dabei kam das Standardverfahren der Antennendrehung nach Ablauf von 24 Stunden zum Einsatz. Die Sollhöhendifferenz wurde durch Präzisionsnivellement bestimmt.

Abb. 4-7 zeigt die elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen der untersuchten Antenne. Die größten Effekte treten im Elevationsbereich unter 15 Grad auf. Im übrigen Empfangsbereich der Antenne ergeben sich mit $\pm$ 2 mm relativ kleine Korrekturen.

Bei statischen Messungen wird durch die Nordausrichtung der Antennen ein eindeutiger Bezug zu den Kalibrierwerten hergestellt. Bei kinematischen Anwendungen hingegen ist eine feste azimutale Ausrichtung meist nicht realisierbar. Analog gelten diese Feststellungen auch für die elevationsabhängigen Korrekturterme. Während der Bewegung des Athleten wird die Antenne auch geneigt.

Beim Skispringen kann durch das bekannte Azimut der Schanze eine rechnerische Korrektur an die mittleren Lageoffsets der Phasenzentren angebracht werden. Die Antennenkippung ist jedoch von der Neigung des Kopfes und damit von der aktuellen Körperhaltung während des Sprungs abhängig. Eine geeignete Erfassung der Kopfneigung ist äußerst schwierig. Deshalb stellt die Einführung von Phasenzentrumskorrekturen in die GPS-Auswertung ein Näherungsverfahren dar. In der Praxis werden jedoch Flugbahndifferenzen eines Athleten betrachtet. Der Offset-Einfluss erlangt kaum Bedeutung, da die Unterschiede in der Kopfneigung des Athleten als gering einzustufen sind und die Beträge der Offsetkomponenten kleine Hebellängen darstellen.

4.2.8 Qualitätsuntersuchungen zum GPS-Helm II

Im Mittelpunkt stand die Frage nach der Leistungsfähigkeit dieser kleinen Zweifrequenzantenne in Kombination mit dem *OEM4-G2L*-Empfänger. Sind damit vergleichbar gute Messungen möglich, wie dies von hochwertigen geodätischen Antennen bekannt ist? Am Beispiel der Datenvollständigkeitsanalyse soll nun gezeigt werden, dass dieser Frage eine große praktische Bedeutung bei der Entwicklung von GPS-Geräten zukommt:

Die Daten der Antennenkalibrierung wurden benutzt, um eine Stationsvalidierung nach dem am Geodätischen Institut der TU Dresden entwickelten Verfahren [Augath u. a. 2002] durchzuführen. Hiermit wurden die folgenden Diagramme

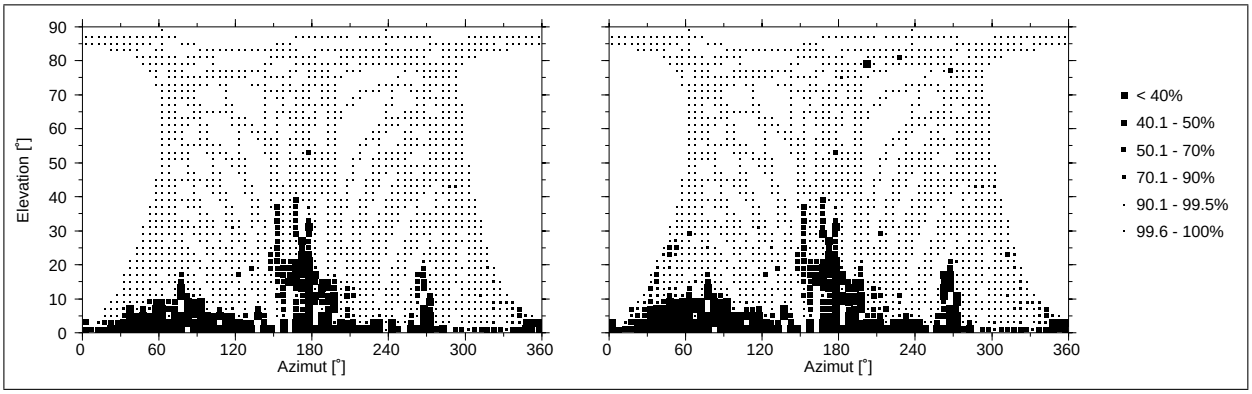

Abb. 4-8: *Datenvollständigkeit L1 (links) und L2 (rechts) der AeroAntenna-Antenne in Westausrichtung*

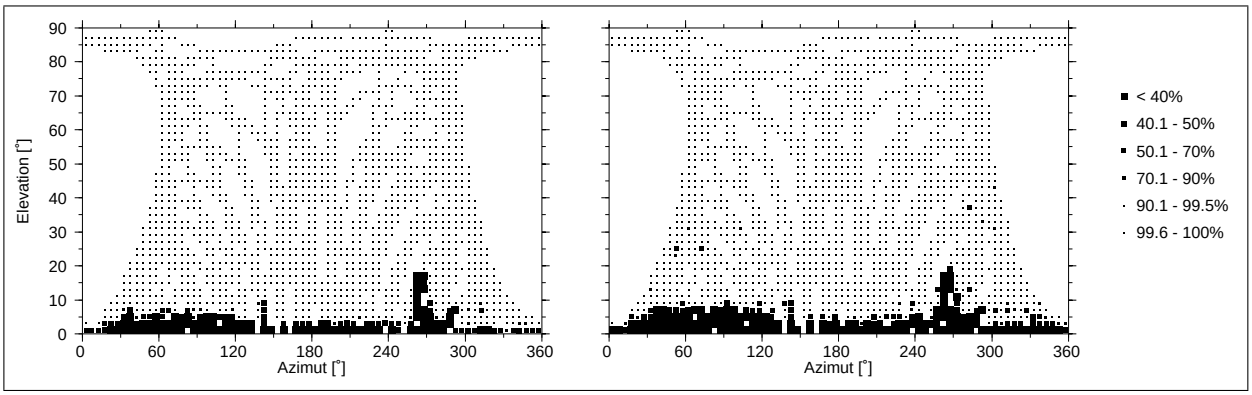

Abb. 4-9: *Datenvollständigkeit L1 (links) und L2 (rechts) der Vergleichsantenne Trimble TRM33429.00*

gewonnen. Die Messungen fanden auf der Messplattform des Instituts statt. Im Westteil des Dachbereiches befindet sich der Turm des Lohrmann-Observatoriums, der zeitweise einige Satellitensignale abschattet. Als Referenz wurden die Daten eines *Trimble 4700*-Empfängers an einer *Trimble TRM33429.00*-Antenne herangezogen. Die untersuchte Antenne befand sich auf einem wenige Meter daneben stehenden Beobachtungspfeiler, um möglichst gleichartige Empfangsbedingungen zu realisieren.

In den folgenden Diagrammen ist jeweils der gesamte Horizont über der Empfangsantenne, eingeteilt in Cluster zu je 5 Grad Azimut und 2 Grad Elevation dargestellt. Jeder kleine Punkt bedeutet, dass Signalquellen in diesem Bereich vorhanden gewesen sind. Die Abbildungen repräsentieren Messungen über einen Zeitraum von 24 Stunden. Leere Cluster bedeuten, dass in diesen Regionen keine Satelliten vorhanden gewesen sind. Das GPS-Nordloch ist deutlich zu erkennen. Weiterhin bedeuten die kleinsten Punkte, dass jeder theoretisch empfangbare Satellit auch tatsächlich empfangen wurde. Ist dies nicht der Fall, werden die Symbole entsprechend der nebenstehenden Legende größer dargestellt. Schwarze Füllung bedeutet, dass unter 40 Prozent der erwarteten Signale auch tatsächlich gemessen worden sind. Dies deutet auf Problemzonen oder Abschattungen hin.

Der Vergleich der Datenvollständigkeit zwischen der *AeroAntenna*- (Abb. 4-8) und der *Trimble*-Antenne (Abb. 4-9) zeigt, dass sich die Empfangseigenschaften kaum unterscheiden. Im niedrigen Elevationsbereich zeichnet sich die Horizontlinie ab. Der Turm des Lohmann-Observatoriums tritt bei ca. 260 Grad Azimut deutlich hervor.

Eine Besonderheit ist im Süden der Station zu finden. Die Vergleichsmessung (Abb. 4-9) zeigt, dass Satellitenempfang möglich ist. Warum mit der *AeroAntenna*-Antenne keine gültigen Daten aufgezeichnet werden konnten, wird an Abb. 4-10 deutlich. Die Antenne wurde zwischenzeitlich von der Westausrichtung in Nordausrichtung gedreht. Der gestörte Bereich verlagert sich ebenfalls um 90 Grad. Das bedeutet, dass im Nahfeld der Antenne eine Störquelle zu suchen ist, die ebenfalls mitgedreht wurde.

Am Steckzapfen der Antenne befand sich ca. 5 cm unterhalb und 3 cm außermittig eine angeschraubte Dosenlibelle zur Horizontierung. Die Metallfassung von ca. 8 cm^2 wirkte als guter Reflektor. Durch Signalüberlagerungen zwischen direktem und reflektierten Signal kam es zu partiellen Auslöschungen. Die Satellitensignale hatten keine ausreichende Signalstärke mehr, um eine unterbrechungsfreie Messung zu gewährleisten. Die anderen Antennenausrichtungen wurden ebenfalls analysiert und bestätigten die Vermutung. In Ostausrichtung der Antenne befand sich die Dosenlibelle in nördlicher Richtung. Da von dort kaum Satellitensignale empfangen werden, war der Effekt erwartungsgemäß kleiner als bei allen anderen Ausrichtungen.

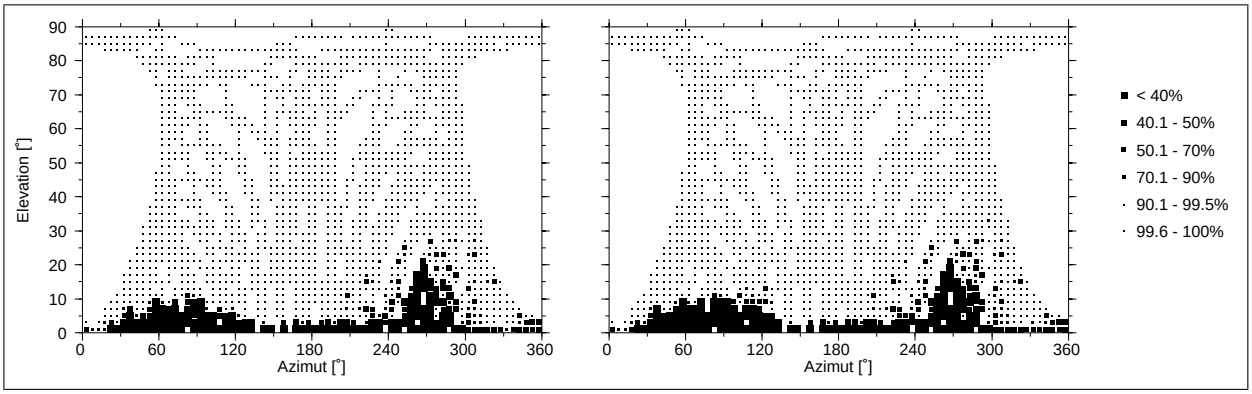

Abb. 4-10: *Datenvollständigkeit L1 (links) und L2 (rechts) AeroAntenna-Antenne in Nordausrichtung*

Fazit

Die Antenne selbst hat also keine ausreichende Dämpfungswirkung für die durch Reflexion und Überlagerung entstehenden Wellenfronten. Reflekierende Materialien im Nahbereich der Antenne, z. B. die Gehäuse der Messeinbauten des Helms, verursachen Störungen. Deshalb ist in jedem Falle eine elektromagnetische Abschirmung in Form einer Grundplatte notwendig. Praktisch ist eine herkömmliche Grundplatte in einem Skihelm nur schwer zu integrieren. Aus diesem Grund wurde aus einer epoxydharzgetränkten und kupferbeschichteten Glasfasermatte eine Halterung hergestellt, die zum Einen die Antenne optimal unter der Helmschale aufnehmen kann und andererseits eine symmetrische gewölbte Abschirmung realisiert. Datenanalysen nach dem o. a. Prinzip belegen die Wirksamkeit dieser Maßnahme. Die unter diesen Bedingungen erzeugten Diagramme unterscheiden sich nun fast nicht mehr von denen in Abb. 4-9.

4.3 Das Prinzip der lasergestützten Helmerfassung in der Bewegung

Die in Abschnitt 3.8.4 genannten drei Methoden zur Unterstützung der Mehrdeutigkeitslösung sind für die Anwendung im Skispringen nicht geeignet. Deshalb stellt sich die Frage, welche anderen Möglichkeiten bestehen. Dabei dürfen sich die in Kap. 3.8.4 schon diskutierten Nachteile einzelner Ansätze nicht negativ auf die Genauigkeit und den Messablauf auswirken.

Wenn es gelingt, den Ort der GPS-Helmantenne an einem ausgewählten Punkt, z. B. während des Anlaufs präzise zu bestimmen, wäre mit dieser Passpunktinformation eine Mehrdeutigkeitslösung für eine Einzelepoche möglich. Die Doppeldifferenz-Beobachtungsgleichungen (3-3) der Trägerphasenmessungen können dann nach den Mehrdeutigkeitstermen $\nabla\Delta N$ aufgelöst werden. Unter der Voraussetzung eines geringen Abstands zwischen Referenz- und Roverantenne können dabei die ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitverzögerungen vernachlässigt werden. Gleichung (3-7) vereinfacht sich zu

$$\nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} = \frac{1}{\lambda}\left(\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} - \varepsilon_{a,b(\nabla\Delta\phi)}^{i,j}\right). \tag{4-6}$$

Aus den bekannten Koordinaten von Referenzstation und Passpunkt kann die Doppeldifferenz-Geometrie $\nabla\Delta R$ berechnet werden. Unter der Annahme geringer Restfehlereinflüsse ε, wie sie von qualitativ hochwertigen Empfängern in möglichst mehrwegereausbreitungsarmer Umgebung erwartet werden können, ist die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf ganze Zahlen möglich.

Geht man weiter davon aus, dass die vorangegangenen und folgenden Messungen ohne Signalunterbrechung erfolgen, kann das gesamte kinematische Segment mit den zur Referenzepoche festgesetzten Mehrdeutigkeiten zeitlich rückwärts bzw. vorwärts prozessiert werden. Die beiden Teilsegmente werden anschließend zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt.

Zur Ortsbestimmung der GPS-Helmantenne wird ein spezielles Lichtschrankensystem eingesetzt. Abb. 4-11 stellt die Messungsanordnung dar. Direkt über dem Schanzentisch in Höhe des Kopfes bilden äquidistante Lichtstrahlen zwischen Sender P1 und Empfänger P2 eine Vertikalebene quer zur Anlaufrichtung P3-P4.

Die Lage eines Körpers in einem kartesischen Koordinatensystem wird allgemein durch drei Koordinatenkomponenten beschrieben. Die gesuchte Position der integrierten GPS-Helmantenne ergibt sich aus folgender Überlegung: Die erste Ortskomponente ist festgelegt durch die Spurführung des Anlaufs. Die zweite Komponente wird definiert durch die Laserstrahlebene senkrecht zur Anlaufspur. Die gesuchte Position kann also nur noch auf einer senkrecht stehenden Geraden im Schnitt von Spur- und Laserstrahlenebene liegen. Dort aber erfassen die Lichtschranken alle Objekte. Da

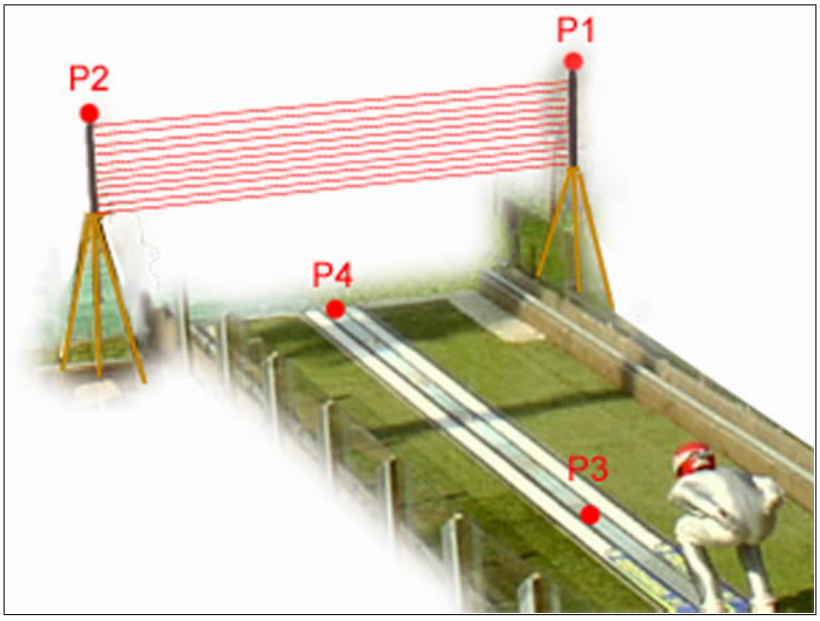

Abb. 4-11: *Messprinzip des Laser-Lichtschrankensystems LLBA16. Beim Absprung des Athleten vom Schanzentisch wird der Helm optisch erfasst.*

die Antenne am höchsten Punkt des Helms angebracht ist, entspricht die dritte Ortskomponente in erster Näherung dem höchsten unterbrochenen Lichtstrahl.

Die Lage der Lichtstrahlen in Bezug zur Anlaufspur können geodätisch bestimmt werden. Somit ist also eine Passpunktinformation für die integrierte Helmantenne berechnenbar. Parallel zur räumlichen Erfassung des Helms wird durch eine automatische Uhrablesung der Zeitpunkt des Ereignisses registriert.

Standortwahl des Lichtschrankensystems

Um auszuschließen, dass durch unvorhersehbare Bewegungen des Athleten GPS-Signalunterbrechungen entstehen, sollte als Aufstellungsort des Geräts irgendein Punkt im Anlaufbereich der Schanze gewählt werden. Die Athleten folgen hier einem genau festgelegten Bewegungsablauf, sofern sie keinen Sturz erleiden wollen. Aus drei Gründen wurde als endgültiger Standort der Schanzentisch ausgewählt.

1. Dieser Bereich ist für das Messpersonal einfach zugänglich.
2. Der Helm ist eindeutig als höchster Punkt zu identifizieren. Mit der Kopfhöhe über dem Schanzentisch steht eine Zusatzinformation für den Trainer zu Verfügung, die sofort mit einer Anzeigetafel dargestellt werden kann (vgl. Kap. 6.4).
3. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung kann rechnerisch gesteigert werden, da neben Helmschalenform und Kopfhaltung auch genäherte Absprunggeschwindigkeiten bekannt sind (vgl. Kap. 4.4.2).

4.4 Aufbau und Funktion des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16*

Systemaufbau

Das in Eigenentwicklung entstandene Laser-Lichtschrankensystem enthält in zwei ca. 1 Meter langen Röhren 16 unabhängige Lichtschranken. Der Abstand der Lichtstrahlen beträgt 4 cm. Der Sender ist mit Laserdioden bestückt, um einen stark gebündelten Lichtstrahl zu erzeugen. Das Laserlicht mit seiner großen Leistungsdichte sorgt dabei für genügend hohen Kontrast zum umgebenden Sonnenlicht. Das ist zur sicheren Funktion unter freiem Himmel unbedingt erforderlich. Die Strahlen treten senkrecht aus dem Gehäuse aus und bilden die in Abb. 4-11 dargestellte Vertikalebene.

Auf der Empfängerseite (vgl. auch Abb. 4-12) befindet sich sechzehnfach jeweils am Ende einer Sonnenschutzblende eine Kollimatoroptik, die das gebündelte Licht auf eine Photodiode leitet. Ein zur Bestrahlungsstärke proportionaler Strom erzeugt am Arbeitswiderstand einen entsprechenden Spannungsabfall, der durch einen Schwellwertschalter nach dem Schmitt-Trigger-Prinzip digitalisiert wird. So entstehen am Triggerausgang die binären Zustände ”0” und ”1” für die Zustände ”Lichtschranke offen” bzw. ”Lichtstrahl unterbrochen”. Ein angeschlossener Microprozessor analysiert

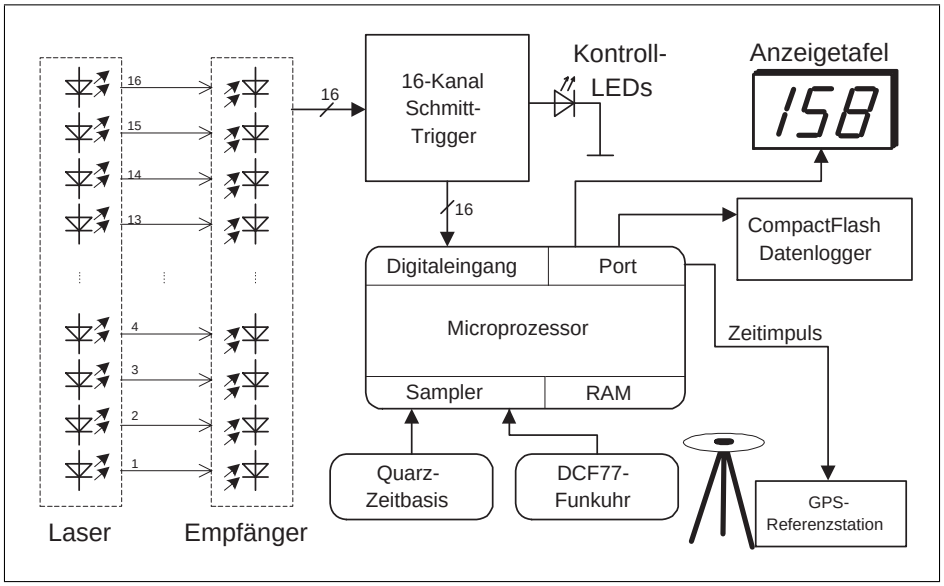

Abb. 4-12: *Blockschaltbild mit Datenfluss des Laser-Lichtschrankensystems LLBA16*

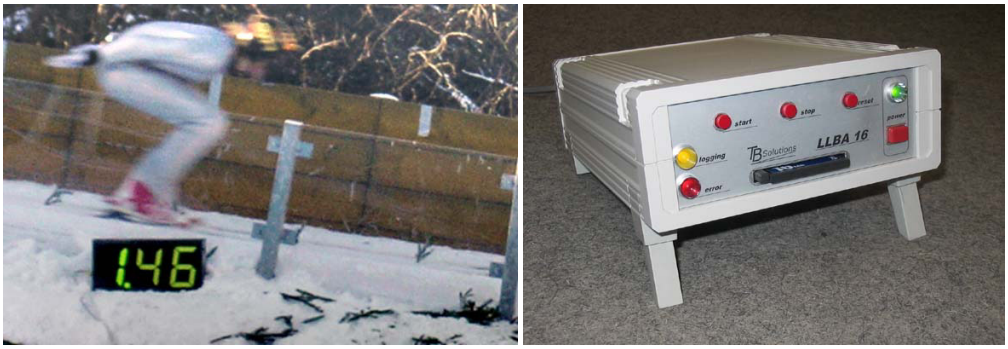

Abb. 4-13: links: *Eine Anzeige stellt als Sofortinformation für den Trainer die Höhe des Helms über dem Tisch dar.* ***rechts:*** *Steuergerät für das Laser-Lichtschrankensystem LLBA16. Wie beim GPS-Helm werden auch hier die Daten auf einer CompactFlash-Karte gespeichert.*

die Daten und speichert sie auf einer *CompactFlash*-Karte. Der Datenlogger entspricht im Wesentlichen dem des GPS-Helms. Ein nachfolgend noch genauer zu erläuternder Mechanismus sorgt dafür, dass die Uhrzeit der Durchfahrt des Athleten präzise bestimmt werden kann.

Der LLBA16-Mess- und Auswerteablauf

Die Auswertung der Lichtschrankenzustände sowie die endgültige Berechnung von Passpunktinformationen, die später zur GPS-Mehrdeutigkeitslösung benutzt werden, erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Der erste Teil kann wiefolgt bereits in Echtzeit vom Lichtschrankensystem durchgeführt werden. Der zweite Schritt erfolgt später im PC unter Einbeziehung der geodätisch bestimmten Lage des Geräts am Schanzentisch und wird im Kap. 5 beschrieben.

Der Prozessor analysiert mit einem sehr kleinen Abtastintervall kontinuierlich die Zustände aller Lichtschranken. Die Messung beginnt, sobald der Athlet einen Lichtstrahl unterbrochen hat. Die Zustände aller Lichtschranken werden nun solange im Hauptspeicher des Steuerprozessors registriert, bis der Athlet die Strahlenebene wieder verlassen hat. Die Aufzeichnung endet in diesem Moment. Es liegen somit hell-dunkel-Informationen über den zeitlichen und räumlichen Verlauf des Helmdurchgangs vor.

Da GPS aber ein Raum-Zeit-Messsystem ist, wird neben den räumlichen Informationen auch die exakte Uhrzeit des Helmdurchgangs benötigt. Jeder einzelnen Abtastung der Laserlichtschranken muss also auch ein GPS-Zeitstempel zugeordnet werden.

Diese Funktionalität ist im *LLBA16*-System auf folgende Weise realisiert. Der Prozessor wird durch einen Schwingquarz ausreichend kurzzeitstabil getaktet. Jedoch besteht kein Bezug zum GPS-Zeitsystem. Der als Referenzstation eingesetzte GPS-Empfänger (vgl. Abb. 4-12) stellt eine sehr genaue GPS-Uhr dar. Er besitzt einen speziellen Signal-

eingang, der zur Erzeugung von präzisen GPS-Uhrablesungen benutzt werden kann. Wird zeitgleich mit der Auslösung der ersten Lichtschranke an diesen Signaleingang ein elektrischer Impuls angelegt, registriert der GPS-Empfänger auf seinem Speichermedium die zugehörige aktuelle GPS-Zeit. Damit ist das erste *LLBA16*-Sample im GPS-Zeitsystem bestimmt. Die Zeiten für alle weiteren Einzelmessungen können durch den Steuerprozessor relativ zur ersten Messung quarzgenau bestimmt werden.

Die integrierte GPS-Antenne befindet sich mittig unter der Helmschale. Der gesuchte Zeitpunkt des Durchgangs des Antennenphasenzentrums entspricht somit dem Mittel der Zeiten für Helmein- und Austritt des höchsten unterbrochenen Laserstrahls.

Zur Registrierung der Zeitstempel

Aus technischen Gründen kann der GPS-Empfänger nur die durch den Triggerimpuls erzeugten Zeitstempel (und natürlich seine gemessenen GPS-Rohdaten) speichern. Die *LLBA16*-Messungen müssen deshalb separat aufgezeichnet werden. Dabei entsteht aber das Problem der eindeutigen Zuordnung der Zeitstempel zu den *LLBA16*-Messwerten.

Damit dies möglich ist, wurde in das Steuergerät der Lichtschranke eine DCF77-Funkuhr eingebaut. Beim Start einer Messung fragt die Steuerung die Funkuhr-Zeit ab und speichert diese gemeinsam mit den anderen Daten auf der *CompactFlash*-Karte. Diese Uhrzeit ist genau genug, um bei der späteren Datenauswertung die entsprechenden GPS-Zeitstempel zu identifizieren.

Echtzeitinformation am Schanzentisch

Der Steuerprozessor des Lichtschrankensystems kann unmittelbar nach dem Helmdurchgang die Nummer des höchsten ausgelösten Strahls ermitteln. Über eine vorherige Einmessung des Systems am Schanzentisch kann daraus die Höhe des Helms über der Anlaufspur berechnet werden. Mit einer angeschlossenen Anzeigetafel (vgl. Abb. 4-13 links) wird diese Information den Trainern angezeigt. Zur Interpretation dieses Parameters wird auf Kap. 6.4 verwiesen.

4.4.1 Verfahren zur Erhöhung der Störsicherheit

Das Laserlicht des *LLBA16* wird durch eine vorgesetzte Optik zu einem Parallelstrahl von nur ca. 3 mm Durchmesser gebündelt. Nun kann es durchaus vorkommen, dass eine einzelne Lichtschranke z. B. durch ein vorbeifliegendes Insekt oder im Winter durch Schneeflocken ausgelöst wird. Ohne besondere Vorkehrungen würde in diesem Fall der komplette Messzyklus ablaufen, ohne dass ein Athlet die Lichtschranke passiert hat. Um das zu verhindern, wurde ein spezieller Test in der Software des Steuerprozessors implementiert, vgl. Abb. 4-14.

Ausgehend von der Überlegung, dass ein Skispringer immer mehrere benachbarte Lichtschranken auslöst, wird das Aufzeichnen der Lichtschrankenzustände im *RAM* beim Auslösen einer einzelnen Lichtschranke zwar gestartet. Aber erst zu dem Zeitpunkt, an dem zusätzlich ein benachbarter Lichtstrahl unterbrochen wurde, erfolgt das Auslösen des Triggerimpulses für den GPS-Empfänger. Der Triggerimpuls wird damit solange künstlich verzögert, bis eindeutig zwischen athletischer bzw. Störauslösung unterschieden werden kann. Der Verzögerungsbetrag wird durch einen internen Zähler bestimmt und zur späteren Korrektur der GPS-Zeit in der Messwertedatei protokolliert, vgl. Abschnitt 5.1.

Dieser Algorithmus basiert auf einer Annahme über das Auftreten von äußeren Störungen. Ohne Beweis wurde unterstellt, dass die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auslösens zweier benachbarter Lichtschranken durch zwei Insekten oder Schneeflocken innerhalb eines Abtastintervalls sehr gering ist. Sollte dennoch der seltene Fall einer Fehlauslösung eintreten, erzeugt das System einen unplausiblen Dateieintrag im Datenlogger, der jedoch leicht identifiziert und übersprungen werden kann. Die Anzeigetafel wird eine dem Ereignis entsprechende Höhe anzeigen, die aber kaum Beachtung finden wird, da kein Athlet gesprungen ist.

Das System hat bei winterlichen Bedingungen mit Schneefall auf der Fichtelbergschanze sehr zuverlässig funktioniert. Innerhalb von drei Stunden wurde nur eine Fehlauslösung registriert. Ohne diesen Algorithmus wäre jedoch keine praktikable Messung möglich gewesen.

4.4.2 Genauigkeitsanalyse des Lichtschrankensystems *LLBA16*

Räumliche Auflösung

Das räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen des Systems wird durch die Abstände der Lichtstrahlen und die Abtastfrequenz bestimmt. Die Laserstrahlen selbst haben einen Durchmesser von 3 mm und können deshalb hier als infinitesimal angenommen werden. Nach der Bewegungsgleichung der Mechanik ergibt sich der zurückgelegte Weg s innerhalb einer Abtastperiode τ bei konstanter Geschwindigkeit v zu:

$$s = v \cdot \tau \tag{4-7}$$

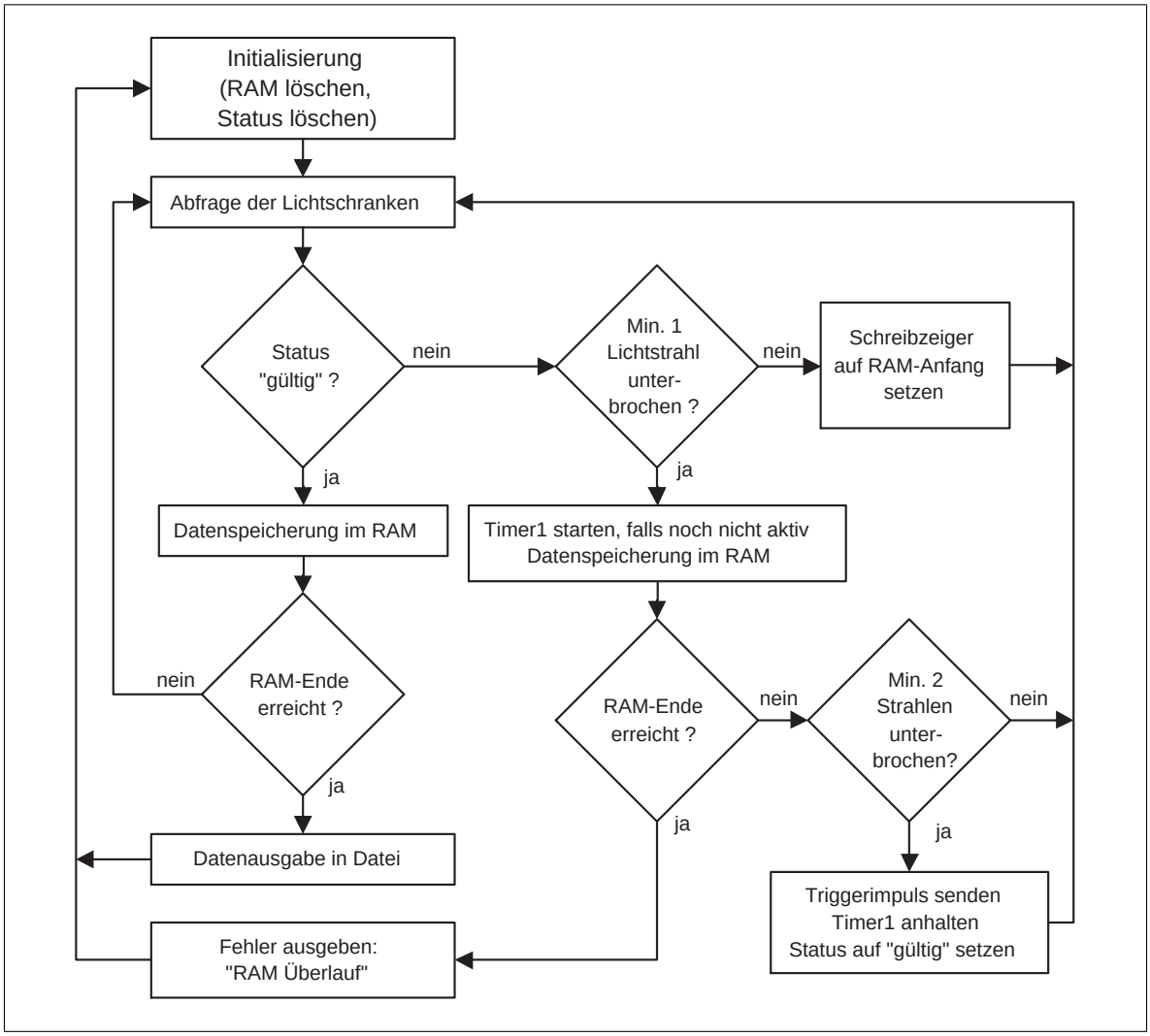

Abb. 4-14: *LLBA16-Detektierungsalgorithmus zur Vermeidung von Fehlauslösungen durch kleinere Objekte im Strahlengang*

Aus Voruntersuchungen kann die maximale Anfahrtsgeschwindigkeit für Großschanzen am Schanzentisch mit 27 m/s abgeschätzt werden. Bei einer gewählten Abtastrate von 250 μs ergibt sich somit eine Auflösung in Sprungrichtung von $\leq$7 mm. Auf kleineren Schanzen sind die Absprunggeschwindigkeiten etwas niedriger, sodass der angegebene Wert als obere Schranke anzusehen ist.

Die vertikale Auflösung ist primär durch den Abstand der Laserstrahlen bestimmt. Der im *LLBA16* realisierte Zwischenraum beträgt 40 mm und stellt einen Kompromiss zwischen optomechanischem und elektrischen Aufwand einerseits sowie der Größe des abzudeckenden Messbereichs auf der anderen Seite dar. Rechentechnisch ist jedoch eine höhere Auflösung erreichbar, da weitere Zusatzinformationen ausgewertet werden können.

Aus Videobildern wurde deutlich, dass die Kopfhaltung der Athleten während der Absprungphase nahezu kontant ist. Ebenso ist die Anfahrtsgeschwindigkeit abschätzbar, z. B. aus der GPS-Messung. Und nicht zuletzt ist die Form der Helmschale ebenfalls bekannt. Abb. 4-15 verdeutlicht den geometrischen Zusammenhang.

Über die geometrischen Beziehungen von Kreis und Sehne lässt sich die Pfeilhöhe und damit der höchste Punkt P in der Lichtstahlenebene berechnen. Der so gefundene Punkt kann unter Benutzung der Antennenkalibrierwerte auf das Antennenphasenzentrum[7] übertragen werden.

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}} \tag{4-8}$$

[7] Das Antennenphasenzentrum ist in Abb. 4-15 nicht dargestellt, liegt aber in der Nähe des Punktes P.

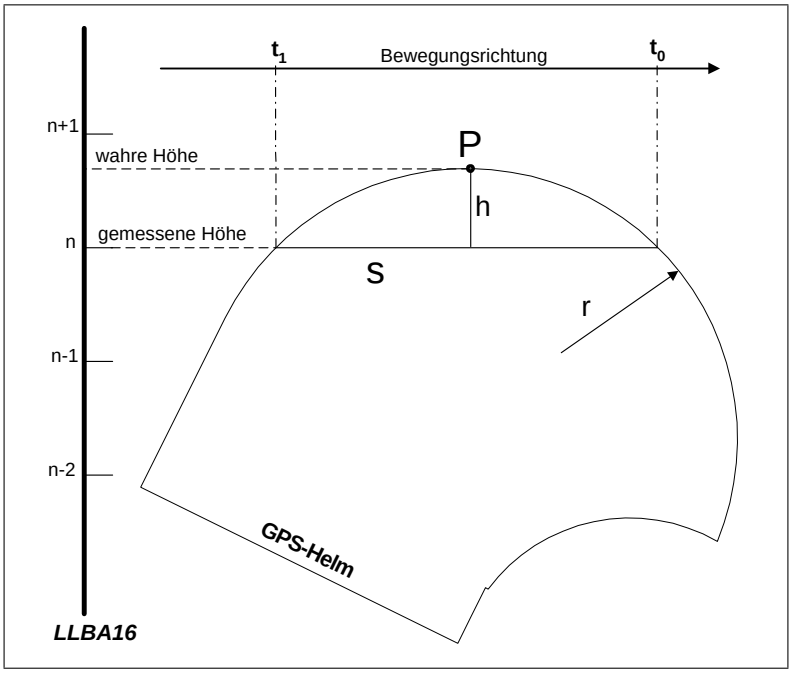

Abb. 4-15: *Zusammenhang zwischen ausgelöster Lichtschranke und höchstem Punkt der Helmschale beim Passieren der vertikale Lichtschrankenebene. Der Punkt P stellt gleichzeitig den Antennenreferenzpunkt ARP dar.*

mit:

- h Pfeilhöhe [m]
- r Helmschalenradius [m]
- S Sehnenlänge [m]

Für die Genauigkeitsabschätzung der *LLBA16*-Höhenkomponente seien folgende Werte und Standardabweichungen angenommen.

Helmschalenradius	$r = 140mm$	$\sigma_r = 25mm$
Geschwindigkeit	$v = 27m/s$	$\sigma_v = 0,5m/s$
Abtastintervall	$\tau = 250\mu s$	$\sigma_\tau = 1\mu s$

Die Standardabweichung des Helmschalenradius ist sehr hoch angesetzt. Damit soll auch der Fall eines tief geneigten Kopfes abgedeckt werden. Hierbei würde der Laser nicht nur den Radiusbereich, sondern auch den abgeflachten hinteren Teil überstreichen. Da das *LLBA16*-System eine Quarzzeitbasis besitzt, ist die Standardabweichung des Abtastintervalls als pessimistische Abschätzung zu verstehen.

Für die maximal mögliche Pfeilhöhe von knapp 4 cm, denn ab da würde der nächst höhere Lichtstrahl unterbrochen werden, ergibt sich aus (4-7) und (4-8) eine Durchgangszeit von 7,2 ms. Gleichung (4-7) eingesetzt in (4-8) ergibt

$$h = f(r, \Delta t, v) = r - \sqrt{r^2 - \frac{(v\Delta t)^2}{4}}. \tag{4-9}$$

Δt ist die Unterbrechungsdauer des höchsten ausgelösten Strahls. Nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz kann durch partielle Differentiation die Standardabweichung σ_h der Pfeilhöhe berechnet werden.

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{\delta f}{\delta r}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta v}\right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta \Delta t}\right)^2 \sigma_t^2 \tag{4-10}$$

$$\sigma_h^2 = \left(1 - \frac{2r}{\sqrt{4r^2 - (v\Delta t^2)}}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{vt^2}{2\sqrt{4r^2 - (v\Delta t)^2}}\right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{v^2 t}{2\sqrt{4r^2 - (v\Delta t)^2}}\right)^2 \sigma_t^2 \tag{4-11}$$

Mit den oben eingeführten Werten ergibt sich für den ungünstigsten Fall maximaler Pfeilhöhe eine Standardabweichung von 10 mm, die in der gleichen Größenordnung wie auch die Auflösung in Fahrtrichtung liegt.

Nun ist es nicht sehr effektiv, die benötigte Geschwindigkeit aus GPS-Messungen abzuleiten, denn die GPS-Auswertung müsste anschließend mit aktualisierten Passpunktkoordinaten wiederholt werden. Betrachtet man die Geschwindigkeit als näherungsweise bekannt ($\sigma_v = 2\,\text{m/s}$), zeigt sich, dass mit einem nur leicht größeren $\sigma_h = 12\,\text{mm}$ deren Einfluss auf die Höhengenauigkeit als gering zu bezeichnen ist. Damit kann praktisch die mittlere Absprunggeschwindigkeit einer Schanze zur Berechnung herangezogen werden. Insbesondere ist die Steuerung der Anzeigetafel am Schanzentisch in der Lage, den höchsten Punkt des Helms mit Zentimeterauflösung ohne vorherige GPS-Prozessierung zu präsentieren. Diese Information steht den Trainern dann auch in Echtzeit zur Verfügung.

Per Definition ist die noch nicht betrachtete Ortskomponente des Passpunkts der Schnitt der Laserstrahlenebene mit einer gedachten Vertikalebene durch die Anlaufspurmitte. Die Raumkurve des Kopfes und damit die der GPS-Antenne im Helm verläuft annähernd über der Spurmitte. Trainingsziel der Athleten ist es, eine symmetrische Körperhaltung einzunehmen und die Absprungkraft mit beiden Beinen gleichmäßig aufzubauen [Neumaier u. a. 1997]. Verlässt der Athlet durch unsymmetrischen Krafteinsatz den Schanzentisch seitlich versetzt, werden die später berechneten GPS-Koordinaten genau um diesen Versetzungsbetrag verschoben sein. Das ist jedoch mit Hilfe der GPS-Messungen im Anlaufbereich sehr leicht zu identifizieren. Wird die Spurmitte mit der gemessenen Kopfposition übereinanderprojiziert, ergibt sich im Fall des unsymmetrischen Beinkrafteinsatzes ein nahezu konstanter seitlicher Offset.

Die Bestimmung der Lage der Anlaufspur in Bezug zum Lichtschrankensystem erfolgt mit Hilfe von Messband, Lot und Gliedermaßstab. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen dabei deutlich über denen der GPS-Positionierung und können mit $\sigma_s \leq 5\,\text{mm}$ abgeschätzt und vernachlässigt werden.

Zeitliche Auflösung

Die Zeitkomponente darf bei einem Raum-Zeit-System, wie es GPS darstellt, nicht vernachlässigt werden. Das interne Quarznormal des *LLBA16*-Systems dient zur Taktung der Lichtschrankenablesung. Der beim Start der Messung erzeugte Triggerimpuls gelangt dabei über ein Kabel an einen stationären GPS-Empfänger, im konkreten Fall vom Typ *NovAtel OEM4*.

Der Hersteller gibt die Genauigkeit dieser so erzeugten GPS-Zeitstempel mit $\sigma_t = 20\,\text{ns}$ unter optimalen Bedingungen an [NovAtel 2003]. Ungünstige Satellitengeometrie, repräsentiert durch hohe TDOP-Faktoren, verringert zwar die Genauigkeit der Zeitstempel. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass die Genauigkeit selbst bei einem TDOP-Faktor von 10 für diese Anwendung noch ausreichend hoch ist.

4.4.3 Justierung des Laser-Lichtschrankensystems *LLBA16*

Die 16 Laserstrahlen müssen über Strecken von bis zu 3 m punktgenau auf die Empfangsoptik auftreffen und dabei einen möglichst kleinen Strahldurchmesser aufweisen. Zur Fokussierung besitzt jedes Lasermodul eine Kollimatoroptik. Der praktisch erreichbare Strahldurchmesser beträgt ca. 3 mm. Da die Empfangsoptik nur einen Durchmesser von 7 mm aufweist, müssen alle optischen Bauteile präzise fixiert sein. Zudem müssen folgende Justierbedingungen eingehalten werden.

- Die Fokusierung jedes Lasers erfolgt so, dass ein paralleler Lichtstrahl minimalen Durchmessers erzeugt wird.
- Die Lasermodule müssen so im Gehäuse justiert werden, dass alle Strahlen horizontal im Raum verlaufen (Nivellierblick) und eine Vertikalebene bilden.
- Die Stehachse des Geräts muss in der durch die Strahlen gebildeten Vertikalebene liegen.
- Die Helligkeit der Strahlen sollte gleich sein.
- Die Hysterese aller Schmitt-Trigger-Kanäle muss identisch eingestellt sein.

Die Justierung der Einzelstrahlen erfolgte unter Laborbedingungen. Dazu wurde eine Zieltafel mit 16 vertikal verteilten Einzelmarken in möglichst großer Entfernung aufgebaut. Über eine Nivellementsmessung wurden die Laser und Zielmarken auf gleiche Höhe gebracht. Jedes einzeln im Grundträger fixierte Lasermodul wurde mit kleinen Stellschrauben justiert.

Der elektrische Abgleich aller Triggerkanäle erfolgte statisch mit Hilfe einer Testschaltung. Als Bedingung galt, dass bei gleichzeitigem Ausschalten aller Laserdioden auch alle Kanäle gleichzeitig auslösen müssen. Dies konnte durch Vergleichsmessung mit einem digitalen Zweistrahl-Speicheroszilloskop leicht nachgewiesen werden.

Der Aufbau des Geräts am Schanzentisch muss auf festem Untergrund, z. B. direkt auf einem Betonteil des Fundaments erfolgen. Besonders empfindlich ist der sendeseitige Standort. Schon geringste Schwingungen führen zu deutlich sichtbaren Strahlauslenkungen am einige Meter entfernten Sensor. Es ist darauf zu achten, dass die durch den vorbeifahrenden Athleten erzeugten Luftwirbel die Lichtschranke nicht in Schwingungen versetzen. Aus Sicherheitsgründen dürfen keine Gegenstände in den beplankten Anlaufbereich hineinragen [FIS 2000].

Abb. 4-16: *Kalibrierung des Laser-Lichtschrankensystems LLBA16 und des GPS-Helms auf der Messplattform des Geodätischen Instituts der TU Dresden. Der Helm ist hier noch mit einer transparenten Schale versehen, damit die Lage der integrierten GPS-Antenne (im Helm oben) optisch bestimmt werden kann. Unter der Antenne befindet sich der Datenlogger, im Hinterkopfbereich der GPS-Empfänger.*

4.5 Validierung des Gesamtsystems

Für die Prüfung des Gesamtsystems aus Lichtschranke und GPS-Helm wurde eine Kalibriervorrichtung entsprechend Abb. 4-16 benutzt. Der Helm war dazu mit einer speziellen Halterung auf einem Schlitten befestigt. Durch die Spurführung konnte eine definierte Längsbewegung erzeugt werden. Quer zur Bahn befand sich die Strahlenebene des Lichtschrankensystems *LLBA16*. Diese Anordnung entsprach der Situation am Schanzentisch.

Als erstes wurde ein Kalibrierwert für die Höhenkomponente des Antennenphasenzentrums bestimmt. Das ist notwendig, da die Lichtschranken durch die Helmschale ausgelöst werden. Die GPS-Messungen beziehen sich jedoch auf den Antennenreferenzpunkt. Aus den GPS-Daten des Helms konnte eine Referenztrajektorie mit hoher Genauigkeit (σ_{Lage} = 6 mm, $\sigma_{Höhe}$ = 8 mm) berechnet werden. Dabei handelt es sich um eine GPS-Lösung, die unter optimalen Bedingungen im Sinne der Bestimmung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten entstand und als ausreichend genau betrachtet wird.

Zeitgleich wurden die Positionen der Lichtschranken mit zwei weiteren GPS-Empfängern bestimmt. Über die bekannte Einbaulage jedes einzelnen Laserstrahls in Bezug zur Antennenaufnahme am oberen Ende der *LLBA16*-Gehäuse (vgl. Abb. 4-16) lässt sich die Höhe des GPS-Helms unabhängig bestimmen. Aus dem Vergleich dieser Werte mit der aus der Helmmessung berechneten Trajektorie ergab sich der Offset zwischen Antennenreferenzpunkt der Helmantenne und dem Auslösepunkt an der Helmschale. Dieser Wert wurde später bei der Auswertung von echten Sprüngen berücksichtigt.

5 Mathematische Modelle zur Datenauswertung

Die Auswertung der GPS-Daten in Verbindung mit den Messwerten des Lichtschrankensystems *LLBA16* gliedert sich in das Schema nach Abb. 5-1 ein. Die folgenden Abschnitte erläutern die Algorithmen der einzelnen Bearbeitungsschritte.

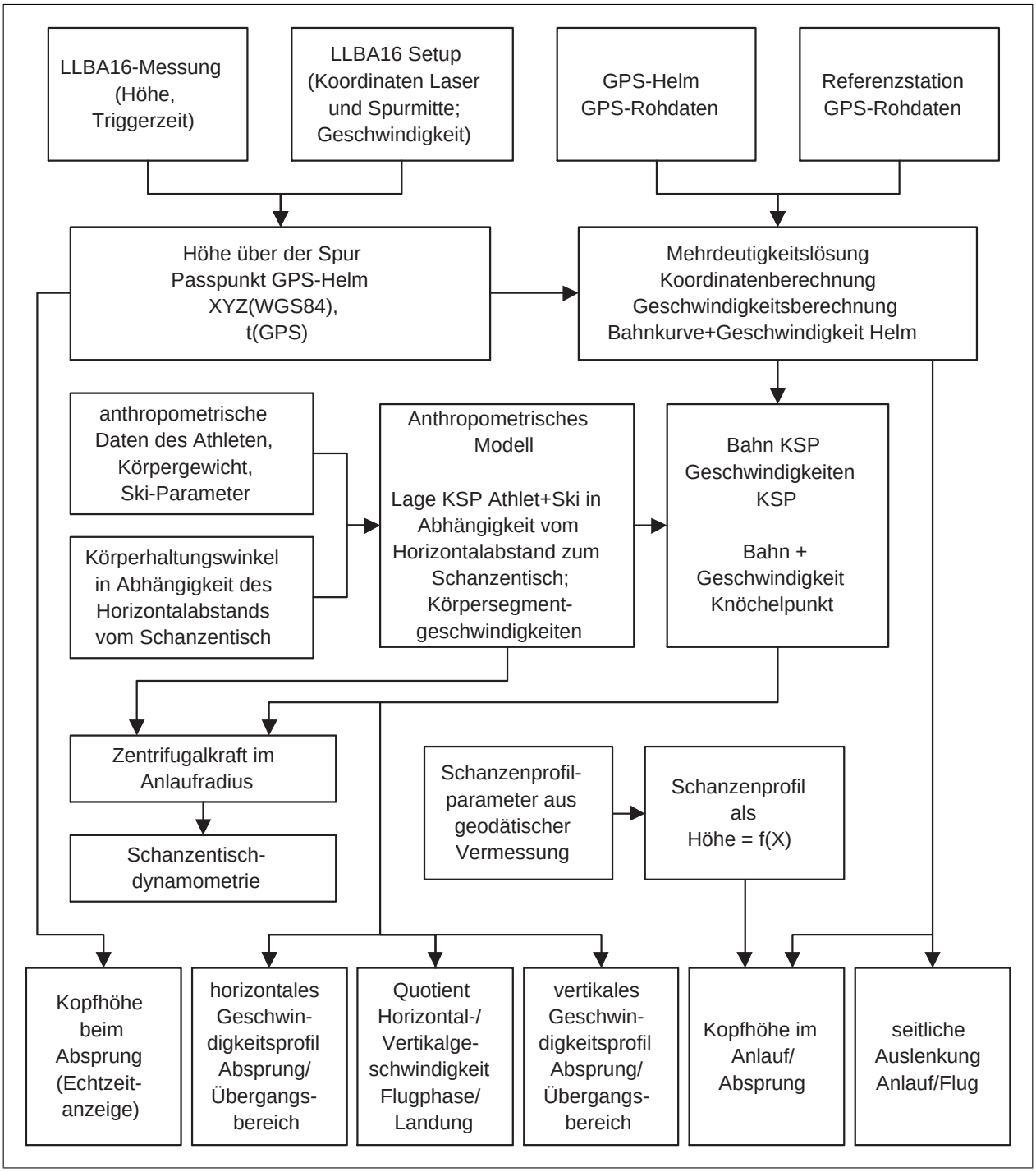

Abb. 5-1: *Überblick über den Ablauf der Datenauswertung*

5.1 Passpunktberechnung *LLBA16*

Als Messwerte des *LLBA16*-Systems liegen die Nummer des höchsten unterbrochenen Laserstrahls sowie der zeitliche Verlauf des Durchgangs des Athleten vor. Für die spätere GPS-Auswertung muss diese Passpunktinformation jedoch in

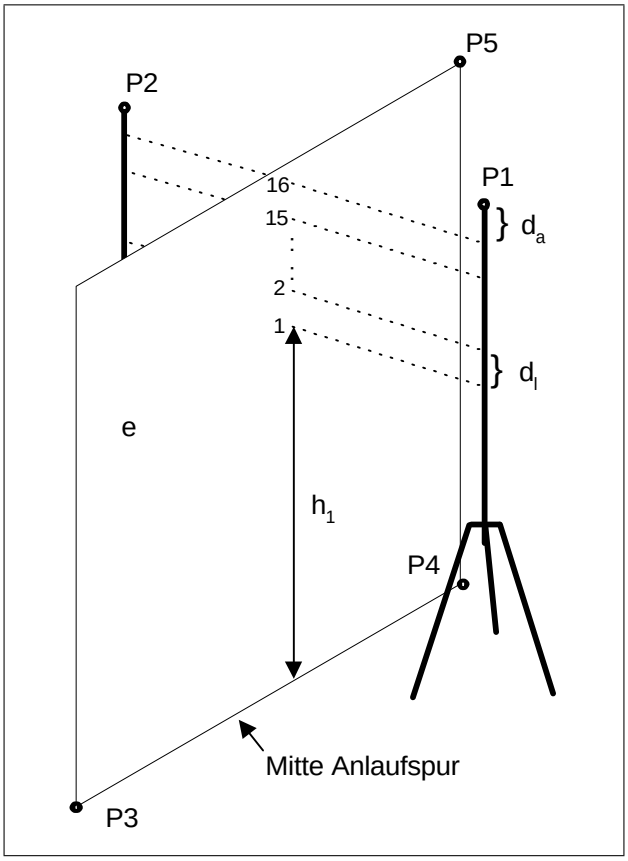

Abb. 5-2: *Skizze zur Berechnung der Passpunkte des LLBA16-Systems*

das WGS84-Koordinatensystem umgerechnet werden. Deshalb ist es erforderlich, das Lichtschrankensystem und die Anlaufspur einzumessen. Dies kann z. B. mit einem RTK-Verfahren erfolgen.

Die *LLBA16*-Gehäuse sind so konstruiert, dass eine GPS-Antenne oben direkt aufgeschraubt werden kann. Dieser Zustand ist in Abb. 4-16 (S. 52) zu sehen. Damit sind die Punkte P1 und P2 (Abb. 5-2) leicht bestimmbar.

P3 und P4 liegen in der Mitte der Anlaufspur und werden ebenfalls durch eine GPS-Messung bestimmt. Die Schnittpunktberechnung für jeden Laserstrahl mit der Vertikalebene durch die Spurmitte erfolgt nun getrennt nach Lage und Höhe. Sind *LLBA16*-Sender und Empfänger lotrecht aufgestellt, haben alle Schnittpunkte die gleichen Koordinaten in der Horizontalebene.

Die Koordinaten werden wiefolgt berechnet: P1 und P2 bilden eine Gerade g im Raum.

$$g : \mathbf{P1} + \lambda_1(\mathbf{P2} - \mathbf{P1}) \tag{5-1}$$

Die Vertikalebene e durch die Anlaufspur ist definiert durch

$$e : \mathbf{P3} + \lambda_2(\mathbf{P4} - \mathbf{P3}) + \lambda_3(\mathbf{P5} - \mathbf{P3}). \tag{5-2}$$

Der Hilfspunkt P5 ergibt sich aus dem um einen beliebigen Betrag vertikal nach oben verschobenen Punkt P4. Für den Durchstoßpunkt von g durch e gilt:

$$g = e. \tag{5-3}$$

In Matrizenschreibweise ergibt sich das lineare Gleichungssystem der Form $Y = A \cdot \lambda$

$$\mathbf{P1} - \mathbf{P3} = \left[\mathbf{P1} - \mathbf{P2}, \mathbf{P3} - \mathbf{P3}, \mathbf{P4} - \mathbf{P3}\right] \cdot \boldsymbol{\lambda}. \tag{5-4}$$

Es kann nach $\boldsymbol{\lambda}$ aufgelöst werden.

$$\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T\mathbf{Y} \tag{5-5}$$

Mit λ_1 und der Geradengleichung lassen sich nun die Horizontalkomponenten aller Durchstoßpunkte berechnen. Die WGS84-Höhe jedes Punktes ergibt sich nach folgender Beziehung.

$$H_i = H_{\mathbf{P1}} - d_a - (16 - i) \cdot d_l \tag{5-6}$$

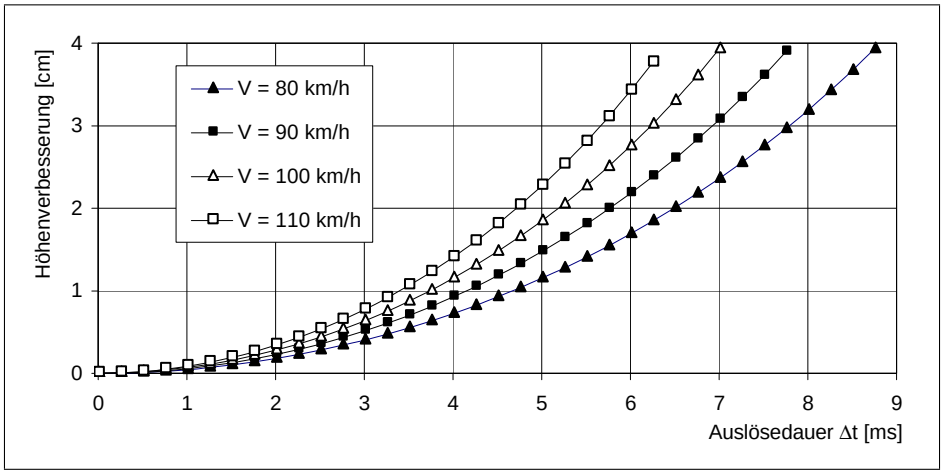

Abb. 5-3: *Höhenverbesserung in Abhängigkeit von Anlaufgeschwindigkeit und Auslösedauer des höchsten Laserstrahls*

mit:

i	Strahlnummer 1 bis 16
H_i	WGS84-Höhe des Strahls i [m]
H_{P1}	WGS84-Höhe des untersten Strahls [m]
d_a	Abstand zwischen Antenne und höchstem Strahl (9,5 cm)
d_l	Abstand zwischen den Laserstrahlen (4,0 cm)

Die im 4 cm-Abstand vorliegenden Passpunkthöhen H_i werden nun nach dem in Kap. 4.4.2 angegebenen Verfahren auf Zentimeterniveau gebracht. Dazu wird der zeitliche Verlauf der Auslösung ausgewertet. Aus Anfang und Ende der Auslösung des höchsten Strahls wird die Zeitdifferenz Δt berechnet. (Der Helmschalenradius r beträgt wie erwähnt 14 cm.) Somit errechnet sich die Höhenverbesserung h zu

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{(v\Delta t)^2}{4}} \qquad \text{mit} \quad 0\,\text{cm} < \text{h} < 4\,\text{cm}. \tag{5-7}$$

Diagramm 5-3 verdeutlicht die Abhängigkeit von der Anlaufgeschwindigkeit v und der Zeitdifferenz Δt. Die endgültige Passpunkthöhe ist somit

$$H_{Pass} = H_i + h\ . \tag{5-8}$$

Durch Ablotung der Durchstoßpunkte auf die durch P3 und P4 gebildete Gerade erhält man die Höhe über der Anlaufspur. Hierzu sei auf λ_2 aus (5-5) verwiesen.

Hierbei soll auf das Problem der Nachbarschaftsgenauigkeit aufmerksam gemacht werden. Die Lotlängen können leicht mit einem Messband direkt nachgemessen werden. Die Höhe über der Anlaufspur wird mit dem angegebenen Rechengang indirekt bestimmt. Dabei wirkt sich die begrenzte Höhengenauigkeit der GPS-Messung aus. Deshalb ist es ratsam, direkt zu bestimmende Maße auch direkt zu messen. Sollten hierbei unzulässig große Differenzen zum Rechenwert auftreten, kann die Durchstoßpunktberechnung entsprechend verbessert werden. Die GPS-Höhenkomponente hat in diesem Fall ein geringeres Gewicht als die Messbandmessungen.

Der Abstand des tiefsten Strahls von der Anlaufspur (h_1) sowie die mittlere Anlaufgeschwindigkeit der Schanze werden vor Inbetriebnahme des Messsystems in die *LLBA16*-Ziffernanzeigetafel am Schanzentisch eingegeben. Im Speicher des Steuerprozessors befindet sich bereits eine Tabelle mit den auf ganze Zentimeter gerundeten Funktionswerten von Gl. (5-7). Somit kann die individuelle Kopfhöhe jedes abspringenden Athleten in Echtzeit angezeigt werden.

Zeitberechnung LLBA16

Aus den in Kap. 4.4.1 dargelegten Gründen gibt es eine Verzögerung t_v bei der Auslösung des Triggerimpulses, die wie folgt berücksichtigt wird.

$$t_{Pass} = t_{GPS} - t_v \tag{5-9}$$

Die Passpunktzeit t_{Pass} bezieht sich nun auf den ersten ausgelösten Lichtstahl. In einem zweiten Schritt muss nun die tatsächliche Lage des Antennenphasenzentrums der Helmantenne berücksichtigt werden. Konstruktiv ist die Antenne so in den Helm eingebaut worden, dass der höchste Punkt des Helms bei typischer Kopfhaltung mit der Lage des Phasenzentrums übereinstimmt.

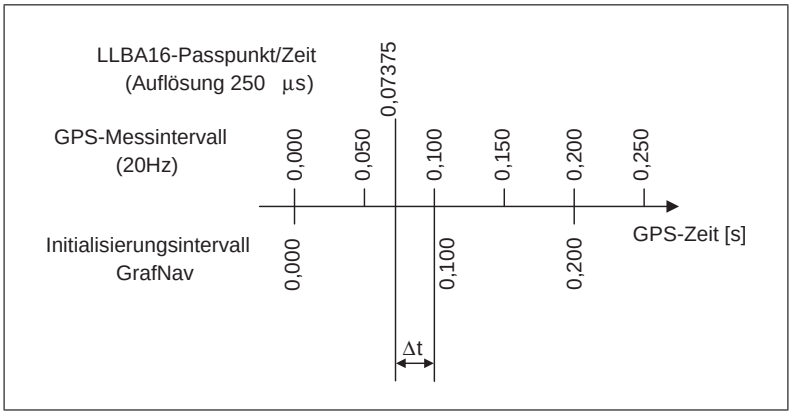

Abb. 5-4: *Interpolation des LLBA16-Passpunktes auf das GrafNav-Zeitintervall*

Aus diesem Grund kann recht einfach auf die Durchgangszeit des Phasenzentrums geschlossen werden. Aus dem Mittelwert der Zeiten von Auslösung und Freigabe (Zeitdifferenz) des höchsten Strahls erhält man den höchsten Punkt des Helms. Somit kann (5-9) erweitert werden zu

$$t_{Pass} = t_{GPS} - t_v + \frac{t_{out} - t_{in}}{2} \; . \tag{5-10}$$

mit:

t_{Pass}	gesuchte Zeit des Passpunktes im GPS-Zeitsystem [s]
t_{GPS}	im GPS-Empfänger gespeicherte Zeit (GPS-Zeitsystem) [s]
t_v	Verzögerung des Triggerimpulses [s]
t_{in}	Auslösebeginn höchster Strahl (*LLBA16*-Zeitsystem) [s]
t_{out}	Ende der Auslösung des höchsten Strahls (*LLBA16*-Zeitsystem) [s]

Damit stehen Ort und Zeit als Passpunktinformationen zur Weiterverarbeitung im Rahmen der GPS-Auswertung bereit.

5.2 Mehrdeutigkeitslösung mit *LLBA16*-Passpunktinformationen

Die in Kap. 6 vorgestellten Ergebnisse wurden mit dem Programmsystem *GrafNav* erzeugt. Dabei wurde ausgenutzt, dass für die kinematische Mehrdeutigkeitslösung eine Initialisierungsoption in der Software vorhanden ist. Durch Vorgabe von Ort und Zeit beliebiger Punkte der Trajektorie kann der interne *Kinematic Ambiguity Resolution*-Algorithmus das Mehrdeutigkeitsproblem korrekt lösen. Das Prinzip wurde bereits in Kap. 4.3 erläutert.

Jedoch ergibt sich ein Problem bei schnellen Bewegungen und hoher GPS-Abtastrate. Die Zeitkomponente des Passpunkts wird programmintern nur auf Zehntelsekunde genau behandelt. Das würde bei den am Schanzentisch auftretenden hohen Geschwindigkeiten zu Verschiebungen im Dezimeter- bis Meterbereich führen. Die Lösung besteht nun darin, den *LLBA16*-Passpunkt um einen gewissen Betrag so zu verschieben, dass er zeitlich auf einem vollen Zehntelsekunden-Intervall liegt. Dazu muss iterativ vorgegangen werden.

In einem ersten Rechengang wird das kinematische Segment mit den durch das *LLBA16*-System erzeugten Passpunkt- und Zeitinformationen berechnet. Dabei kommt es i. d. R. zu Abweichungen aufgrund der Rundung der Uhrzeit, vgl. Abb. 5-4. Das gesamte Segment ist um den Betrag $v\Delta t$ zur nächstliegenden vollen Zehntelsekunde verschoben.

In einem zweiten Rechenschritt wird aus der aktuellen Geschwindigkeit am Passpunkt und der Zeitdifferenz Δt der Translationsbetrag für alle drei Koordinatenkomponenten berechnet. Der Passpunkt wird nun um diesen Betrag verschoben und erneut in die Initialisierung eingeführt. Die dazugehörige Zeit liegt nun im Zehntelsekunden-Raster.

Als letzter Schritt wird das kinematische Segment erneut berechnet. Es entsteht eine lagerichtige Lösung, die in jedem Fall auf Plausibilität geprüft werden sollte. Dazu kann die Kopfhöhe über der Spur zur wahren *LLBA16*-Durchgangszeit herangezogen werden. Dieser Wert wird unabhängig voneinander mit GPS und mit dem *LLBA16*-System bestimmt.

5.3 Berechnung des Körperschwerpunkts des Menschen

Die bei der GPS-Auswertung berechneten Positionen und Geschwindigkeiten beziehen sich auf das Phasenzentrum der Helmantenne. In der Sportwissenschaft ist es üblich, die Bewegung des Körperschwerpunkts (KSP) zu beschreiben. Dazu muss die Lage des KSP in Abhängigkeit der aktuell eingenommenen Körperhaltung berechnet werden.

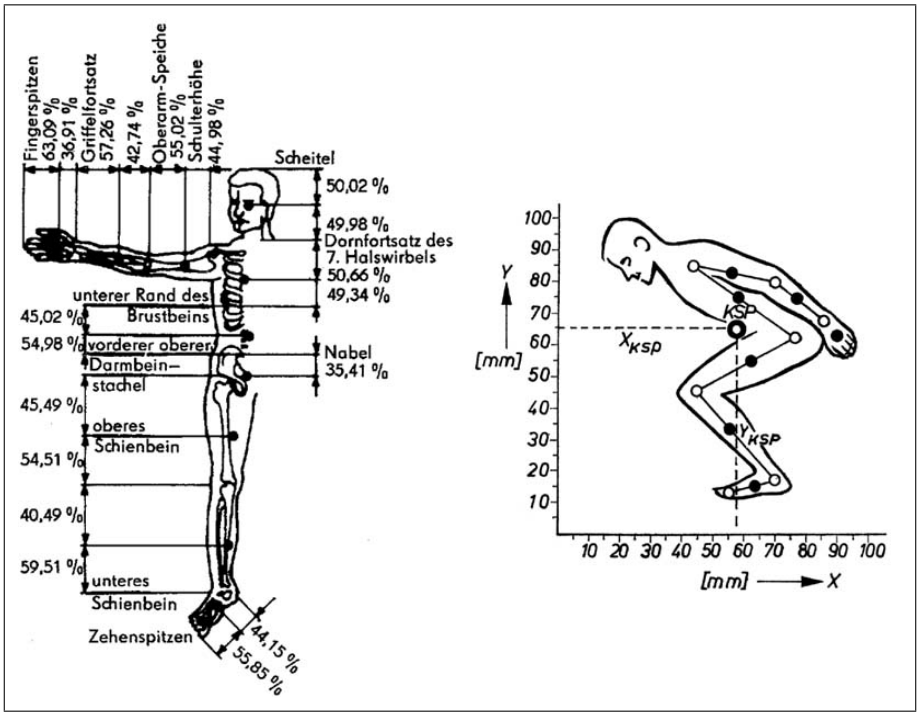

***Abb. 5-5: links**: Segmentaufteilung des menschlichen Körpers und Lage der Segmentschwerpunkte nach [Saziorski 1984], **rechts**: analytische Schwerpunktberechnung nach [Hochmuth 1981]*

Der linke Teil von Abb. 5-5 zeigt die Segmentierung des menschlichen Körpers nach Saziorski. In der Tab. 5-1 sind die entsprechenden prozentualen Segmentmassen angegeben.

Befindet sich ein Körper im Gleichgewicht, so ist die Summe aller Gewichtskräfte gleich der Stützkraft, auch Bodenreaktionskraft genannt. Analog gilt dies auch für das Drehmoment.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F}_S - \sum_i \overrightarrow{F}_i &= 0 \\ \overrightarrow{r}_S \times \overrightarrow{F}_S - \sum_i \overrightarrow{r}_i \times \overrightarrow{F}_i &= 0 \end{aligned} \tag{5-11}$$

mit:

$\overrightarrow{F}_S$	Stützkraftvektor, Bodenreaktionskraftvektor [N]
$\overrightarrow{r}_S$	Verbindungsvektor vom Schwerpunkt zum Bezugspunkt [m]
i	Segmentindex
$\overrightarrow{F}_i$	Gewichtskraftvektor des Segments i [N]
$\overrightarrow{r}_i$	Verbindungsvektor vom Schwerpunkt des Segments i zum Bezugspunkt [m]

Da die Summe aller Gewichtskräfte durch eine Gesamtkraft ersetzt werden kann, ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht der Vektor $\overrightarrow{r}_S$ zwischen Schwerpunkt und Drehachse des Systems zu

$$\overrightarrow{r}_S = \frac{1}{|\overrightarrow{F}_{ges}|} \sum_i |\overrightarrow{F}_i| \cdot \overrightarrow{r}_i \,. \tag{5-12}$$

Für das Skispringen kann von einem symmetrischen System bezüglich der Sagittalebene ausgegangen werden. Damit liegt eine Raumkomponente des Körperschwerpunkts in dieser Ebene.

Die beiden anderen Komponenten berechnen sich wie folgt. Gegeben ist das Bild eines Athleten mit einem rechtwinkligen Koordinatensystem (Abb. 5-5 rechts). Nachdem die Bildkoordinaten der Gelenkpunkte ermittelt wurden, werden die Schwerpunktradien[8] auf den Segmentlängsachsen abgetragen. Durch Multiplikation der daraus resultierenden Koordinatenkomponenten der Schwerpunkte mit den Teilgewichten erhält man die Teilkörpermomente. Mit (5-12) ergibt

[8] Als Schwerpunktradius wird der Abstand des Teilkörperschwerpunkts vom proximalen Gelenk bezeichnet.

Tab. 5-1: *Relative Masse der Körpersegmente des menschlichen Körpers, ermittelt mit der Radioisotop-Methode an 100 Männern (nach [Saziorski 1984])*

Segment	**relative Masse (gerundet)** [% der Gesamtmasse]
Kopf	6,9
Rumpf, gesamt	43,5
Oberarm	2,7
Unterarm	1,6
Hand	0,6
Oberschenkel	14,2
Unterschenkel	4,3
Fuß	1,4

sich somit:

$$X_{KSP} = \sum_i \Delta G_i \cdot X_i \,, \qquad Y_{KSP} = \sum_i \Delta G_i \cdot Y_i \,. \tag{5-13}$$

mit:

X_{KSP}, Y_{KSP}	Koordinaten des Körperschwerpunkts [m]
i	Segmentindex
X_i, Y_i	Koordinaten des Teilkörperschwerpunkts i [m]
$\Delta G_i = \frac{\lvert\vec{F}_i\rvert}{\lvert\vec{F}_{ges}\rvert}$	prozentuale Gewichtskraft des Segments i [N]

5.4 Messwertzentrierung

Numerische Flugbahnsimulationen betrachten typischerweise den Körperschwerpunkt des Skispringers. Im speziellen Fall der Videoauswertung der Absprungphase wird aber auch das Fußgelenk als Bezugspunkt gewählt, um den Abstand des Athleten von der Schanzentischkante unabhängig von der Körperhaltung darstellen zu können. Die mit GPS bestimmten Positionen und Geschwindigkeiten, die sich auf die Helmantenne beziehen, müssen deshalb entsprechend ”zentriert” werden.

In erster Näherung könnte das System Skispringer als starrer Körper angenommen werden. Das ist aber nicht praktikabel, denn im Verlauf eines Skisprungs treten signifikante Haltungsänderungen auf. So verlagert sich z. B. der KSP während des Absprungs um rund 10 cm horizontal nach vorn [Mahnke und Mroß 1995]. Durch die Aufstehbewegung wird zudem eine nicht zu vernachlässigende vertikale Relativgeschwindigkeit von etwa 2 m/s nach oben [Schwameder und Müller 1995] erzeugt.

In der Praxis werden 2D- oder 3D-Modelle des Skispringers eingesetzt. Erstere sind sinnvoll, wenn mit starren Videokameras Aufnahmen von der Seite erzeugt werden. Als Ergebnis stehen dann Körperwinkel in Abhängigkeit von der Flugweite zur Verfügung. Abb. 5-6 veranschaulicht dies. Die momentane Flugbahnneigung kann entweder durch fortlaufende Digitalisierung eines ausgewählten Punktes, z. B. des Fußgelenks aus aufeinanderfolgenden Bildern einer Kamera ermittelt werden. Eine andere Möglichkeit besteht nun auch darin, die GPS-Messung zu nutzen. In Phasen relativ starrer Körperhaltung kann die Geschwindigkeit des Kopfes als repräsentativ für das Gesamtsystem angesehen werden. Somit gilt dann für jeden Messpunkt:

$$\alpha = arcsin \frac{v_{vertikal}}{v} \tag{5-14}$$

mit:

$v_{vertikal}$	Vertikalgeschwindigkeit [m/s], (positiv nach unten)
v	Gesamtgeschwindigkeit [m/s]
α	Neigungswinkel der Flugbahn [°]

Damit ist die Bezugsgröße für alle anderen Körperwinkel ermittelt. Die Bildkoordinaten der Gelenkpunkte werden nun zur Berechnung von Ski-Anstellwinkel, Oberkörper- und Unterkörperwinkel herangezogen. Im Anlaufbereich

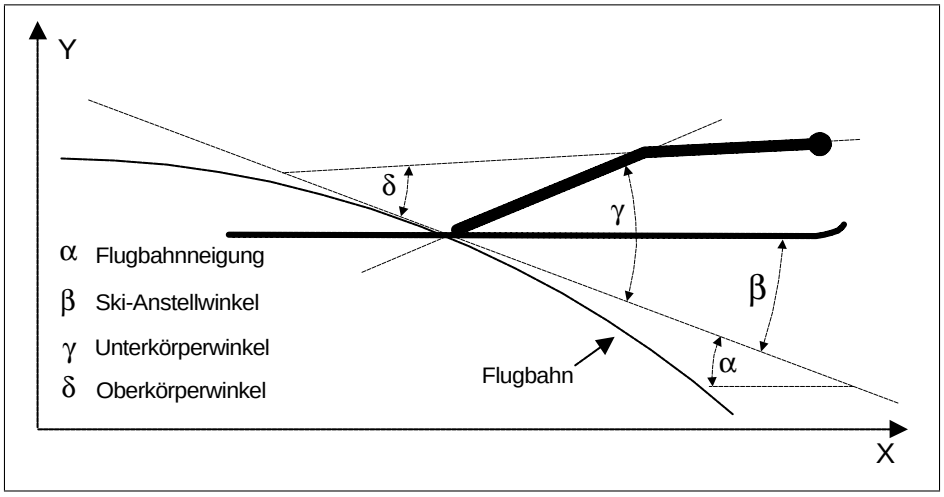

Abb. 5-6: *Körperwinkel in der Flugphase*

wird zusätzlich der Kniewinkel bestimmt. Unter Zuhilfenahme der anthropometrischen Daten des Athleten kann der Bildmaßstab und somit ein Raumvektor für jedes Körpersegment berechnet werden.

Die Lage des Körperschwerpunkts im Videobild wird nach dem in Kap. 5.3 dargestellten Verfahren ermittelt. Die so berechnete Position kann nun als gemeinsamer Bezugspunkt, z. B. für die Flugbahnmodellierung genutzt werden.

Die Reduktion der mit GPS bestimmten Kopfgeschwindigkeit auf den Körperschwerpunkt oder den Knöchelpunkt erfolgt analog. Aus der zeitlichen Abfolge der einzelnen Videobilder werden Geschwindigkeiten für die Lageänderung der Körpersegmente und damit des Körperschwerpunkts ermittelt. Diese werden in Horizontal- und Vertikalkomponente aufgeteilt und von den GPS-Messwerten abgezogen.

Wäre es möglich, mehrere GPS-Antennen (und Empfänger) an verschiedenen Körperteilen des Athleten oder an den Skiern anzubringen, könnten aus den GPS-Positionsdifferenzen Lagewinkel und deren zeitliche Änderung berechnet werden. Leider funktioniert das technisch nicht, denn der Athlet würde die Satellitensignale zu den tiefer liegenden Antennen mit seinem Körper abschatten. Deshalb können die Gelenkpunkte bisher nur aus Videobildern ermittelt werden. Der Einsatz von Goniometern ist prinzipiell möglich, erscheint aber aufgrund des großen Verkabelungsaufwands am Athlet nicht sinnvoll.

5.5 Geschwindigkeitstransformation beim Absprung

Die mit GPS bestimmten Koordinaten und Geschwindigkeiten beziehen sich auf ein Koordinatensystem mit Lage- und Höhenkomponente. Die Lagekomponenten bilden dabei eine Horizontalebene, auf der die Höhenkomponente senkrecht steht.

Durch die allgemeine Definition der Begriffe Anfahrts-, Absprung- und Abfluggeschwindigkeit [Hochmuth 1981] ist ein Koordinatensystem festgelegt, welches der Schanzentischneigung angepasst ist, vgl. Abb. 5-7. Die Anfahrtsgeschwindigkeit wird in Bewegungsrichtung entlang der Spur angegeben. Die Absprunggeschwindigkeit verläuft in Normalenrichtung zur Tischebene. Die Resultierende ergibt sich aus der vektoriellen Überlagerung der beiden Komponenten.

Die mit GPS bestimmten Geschwindigkeiten werden in einem ersten Schritt vom Kopf auf den Körperschwerpunkt oder Knöchelpunkt reduziert. Durch anschließende Rotation des Koordinatensystems um den Betrag der Schanzentischneigung werden die Geschwindigkeiten in das Schanzentischsystem transformiert.

$$\begin{pmatrix} v_{Anfahrt} \\ v_{Absprung} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} v_X \\ v_Y \end{pmatrix} \tag{5-15}$$

mit:

$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} cos(\alpha) & -sin(\alpha) \\ sin(\alpha) & cos(\alpha) \end{pmatrix}$ Rotationsmatrix

α Schanzentischneigung [°]

v Geschwindigkeitskomponente [m/s]

Damit stehen nun Werte zur Verfügung, die mit Parametern anderer Messverfahren verglichen werden können.

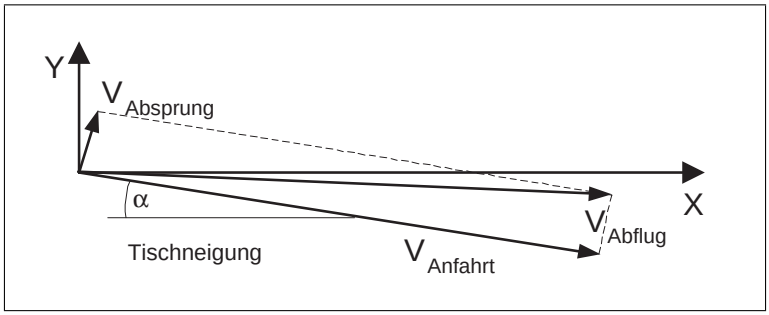

Abb. 5-7: *Zur Definition von Anfahrts-, Absprung- und Abfluggeschwindigkeit*

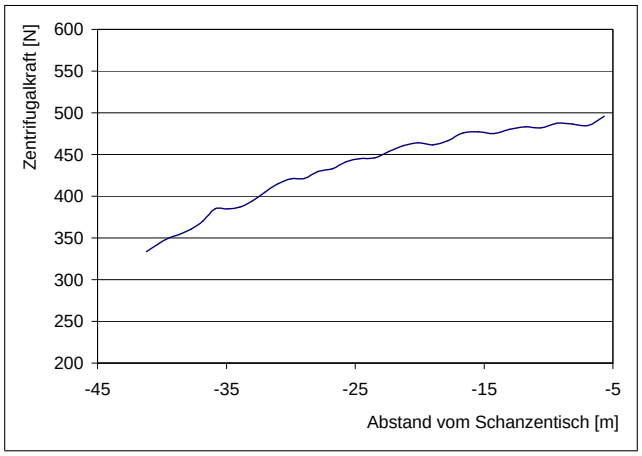

Abb. 5-8: *Zentrifugalkraft im Anlaufradius (R_1 = 84,88 m) für einen 65 kg schweren Springer. Die Geschwindigkeit wurde mit Hilfe einer GPS-Messung ermittelt.*

5.6 Zentrifugalkraft im Anlaufradius

Für die dynamometrischen Untersuchungen im Anlauf- und Absprungbereich sind Kraftmessplatten unter der Spur montiert. Durchfährt der Athlet den Radiusbereich des Anlaufs, wirkt zusätzlich zur Gewichtskraft eine geschwindigkeitsabhängige Zentrifugalkraft.

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{R_1} \tag{5-16}$$

mit:

F_Z	Zentrifugalkraft [N]
m	Masse des Athleten + Ausrüstung [kg]
v	Tangentialgeschwindigkeit [m/s]
R_1	Radius des Anlaufs [m]

Die Kraftmesseinrichtung registriert damit neben der Gewichtskraft des Athleten im Radiusbereich des Anlaufs auch die Zentrifugalkraft. Soll daraus nun die Absprungkraft ermittelt werden, müssen auch hierfür diese beiden Anteile berücksichtigt werden.

An der Schanze werden zur Geschwindigkeitserfassung Lichtschranken in Unterschenkelhöhe verwendet. Jedoch sind die Messstrecken meist einige Meter lang, sodass nur mittlere Geschwindigkeiten bestimmt werden können. Bei einer durchschnittlichen Anlaufgeschwindigkeit von 25 m/s am Radiusende bewirkt eine Geschwindigkeitsabweichung von 0,5 km/h eine Veränderung der berechneten Zentrifugalkraft in der Größenordnung von 5 N.

Aus den GPS-Messungen ist ein kontinuierliches Geschwindigkeitsprofil im gesamten Anlaufbereich bekannt. Deshalb kann die Zentrifugalkraft auch über diese Messwerte mit einer höheren räumlichen Auflösung berechnet werden. Abb. 5-8 stellt den typischen Verlauf der auf einen 65 kg schweren Athleten wirkenden Zentrifugalkraft dar. Jedoch ist ein Restrauschen dieser ungeglätteten Kraftkurve vorhanden, denn die Geschwindigkeit wird hier am Kopf gemessen. Durch Haltungskorrekturen können zusätzliche scheinbare Bewegungen entstehen, die somit Einfluss auf die Genauigkeit der berechneten, nicht jedoch auf die reale Zentrifugalkraft haben.

6 Ausgewählte Ergebnisse

Im Februar 2004 wurden mit zwei Athleten aus dem DSV-Nachwuchskader GPS-Messungen durchgeführt. Zusätzlich dazu konnten die Sprünge mit der Video-Messtechnik des Instituts für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT) Leipzig aufgezeichnet werden. Die hierzu genutzte Fichtelbergschanze in Oberwiesenthal verfügt im Anlaufbereich über eine Kraftmessplattform, die ebenfalls zur Verfügung stand. Die Tabellen 6-1 und 6-2 zeigen die Eckdaten der aufgenommenen Sprünge. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Phasen eines Sprungs näher betrachtet. Vorangestellt sei eine Bemerkung zur Sprungweite.

Tab. 6-1: *Trainingssprünge Athlet C.*

Datum/Zeit	**Durchgang**	**Anlaufgeschwindigkeit** [km/h]	**Weite** [m]	**Weite** $_{GPS}$ [m]
24.2.04 14:42 Uhr	1	90.44	78	77
24.2.04 14:52 Uhr	2	91.84	88	nicht gemessen
24.2.04 15:04 Uhr	3	91.70	89	89
24.2.04 15:23 Uhr	4	91.92	91	91
25.2.04 14:22 Uhr	1	88.87	71	71
25.2.04 14:31 Uhr	2	90.11	83	83
25.2.04 14:40 Uhr	3	90.84	85	86
25.2.04 14:49 Uhr	4	91.34	90	89

Tab. 6-2: *Trainingssprünge Athlet W.*

Datum/Zeit	**Durchgang**	**Anlaufgeschwindigkeit** [km/h]	**Weite** [m]	**Weite** $_{GPS}$ [m]
25.2.04 10:08 Uhr	1	89.47	58	63
25.2.04 10:17 Uhr	2	89.62	75	79
25.2.04 10:26 Uhr	3	90.03	73	73
25.2.04 10:37 Uhr	4	90.12	71	75

6.1 Zur Überprüfung der Sprungweite

Für die Bestimmung der Sprungweite in Wettkämpfen wurde vom IAT Leipzig ein videobasiertes Verfahren entwickelt [Kindler 1993]. Beim Training ist es jedoch üblich, dass ein Assistent die Sprungweite visuell von einem geeigneten Standort aus bestimmt. Dieses Verfahren ist für Trainingszwecke ausreichend genau. Es kommt jedoch zu Differenzen mit den aus GPS-Messungen bestimmten Sprungweiten. (Die letzte Spalte der o. a. Tabellen enthält daher auch die Weite, wie sie sich aus der GPS-Auswertung ergibt.)

Die Erklärung hierfür lautet wiefolgt: Während der Landephase erreichen die Athleten Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h. Bei einer derzeit realisierbaren Abtastrate von 20 Hz ergibt sich somit ein GPS-Messpunktabstand von ca. 1,4 m, denn es gilt

$$\frac{100\ km/h}{3,6 \cdot 20\ Hz} \approx 1,4\ m. \tag{6-1}$$

Die gemessene Bahn des Kopfes bildet weiterhin einen schleifenden Schnitt mit dem Hang. In der graphischen Darstellung der Flugbahn über dem Hangprofil ist der Landepunkt nicht erkennbar. Deutlicher hebt er sich in den Geschwindigkeitsprofilen heraus, vgl. Abb. 6-1. Durch die plötzlich wirkenden Bodenkräfte beim Aufsetzen ergibt sich eine gut erkennbare Geschwindigkeitsänderung, die mit dem Landepunkt in Verbindung gebracht werden kann. Aber auch hier ist der relativ große Messpunktabstand zu berücksichtigen. Deshalb ist einzuschätzen, dass GPS unter diesen Bedingungen nur eine Möglichkeit zur Grobfehlerprüfung der Sprungweite darstellt.

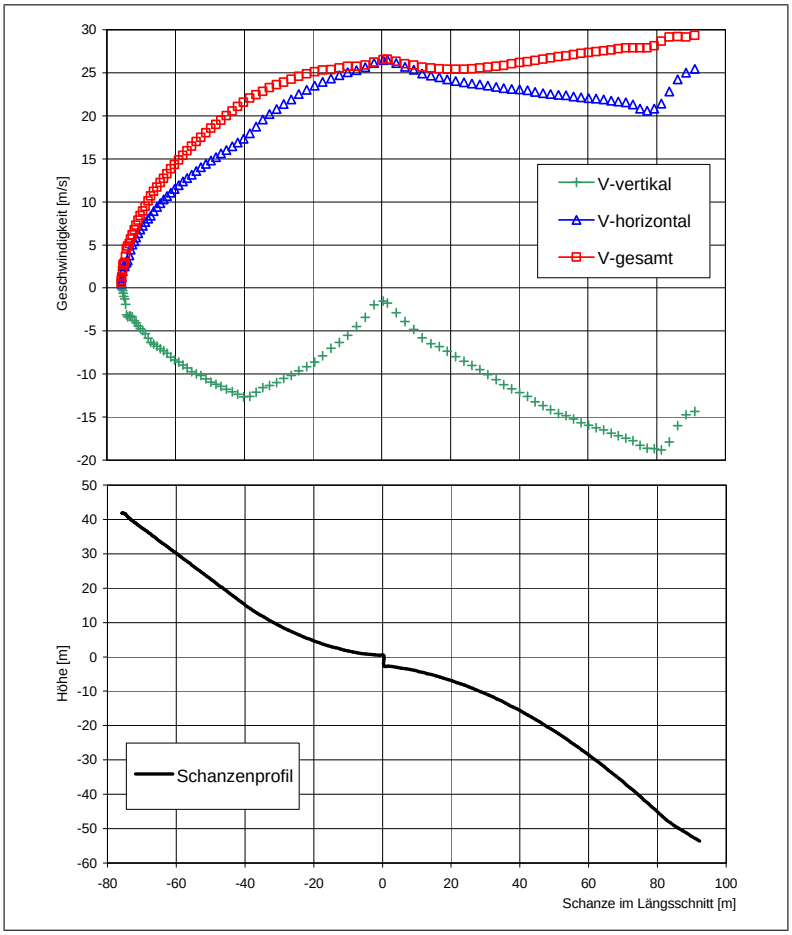

Abb. 6-1: *Prinzipieller Geschwindigkeitsverlauf eines Skisprungs. Aufgrund des Darstellungsmaßstabs, der für eine Betrachtung des Gesamtverlaufes notwendig ist, können jedoch keine Details erkannt werden.*

6.2 Allgemeiner Geschwindigkeitsverlauf eines Sprungs

Abb. 6-1 zeigt das Schanzenprofil als Ganzes. Zu erkennen ist das zugrunde liegende Koordinatensystem. Die Horizontalachse ist in Sprungrichtung positiv orientiert. Die angegebenen Maßzahlen sind dabei nicht mit der Sprungweite gleichzusetzen, da sich diese aus der Bogenlänge des Aufsprunghangs unter Beachtung der Schanzentischkante ergibt [FIS 2001].

Die vertikale Achse ist nach oben hin positiv orientiert. Die Schanzentischkante ist der Nullpunkt. Vertikalgeschwindigkeiten mit negativem Vorzeichen sind demzufolge Sinkgeschwindigkeiten.

Betrachtet man den Graphen der Gesamtgeschwindigkeit, findet man ein lokales Maximum im Absprungbereich. Daran schließt sich eine Phase mit kurzzeitigem Geschwindigkeitsverlust an. Das ist begründet durch die sich öffnende Körperhaltung beim Übergang in die Flugphase. Die Luftkräfte steigen erheblich an und verlangsamen die Bewegung. Danach schließt sich die Flugphase an. Im freien Fall zeigt der Graph einen parabelförmigen Anstieg der Gesamtgeschwindigkeit. An ihrer plötzlichen Trendänderung in den Graphen der Horizontal- und Vertikalkomponente ist der Landepunkt deutlich zu erkennen.

6.3 Untersuchung der Anfahrtshöhe

Mit einer optimalen Anlaufphase werden die Voraussetzungen für einen weiten Sprung geschaffen. Hierbei kommt es darauf an, die am Start vorhandene potentielle Energie zunächst möglichst verlustfrei in kinetische Energie unzuwandeln. Einflussgrößen dabei sind die Reibungskräfte zwischen Skilaufsohle und Spur sowie die Luftwiderstandskräfte. Die Einflüsse durch Gleitreibung sollen nicht betrachtet werden, da diese maßgeblich von einer guten Präparation der Skier abhängig sind.

Anders verhält es sich bei den Luftwiderstandskräften. Für jeden Athleten gibt es eine optimale Anfahrtshaltung, die z. B. durch Erkenntnisse aus Windkanaluntersuchungen begründet ist. Hat der Athlet diese eingenommen, sollte

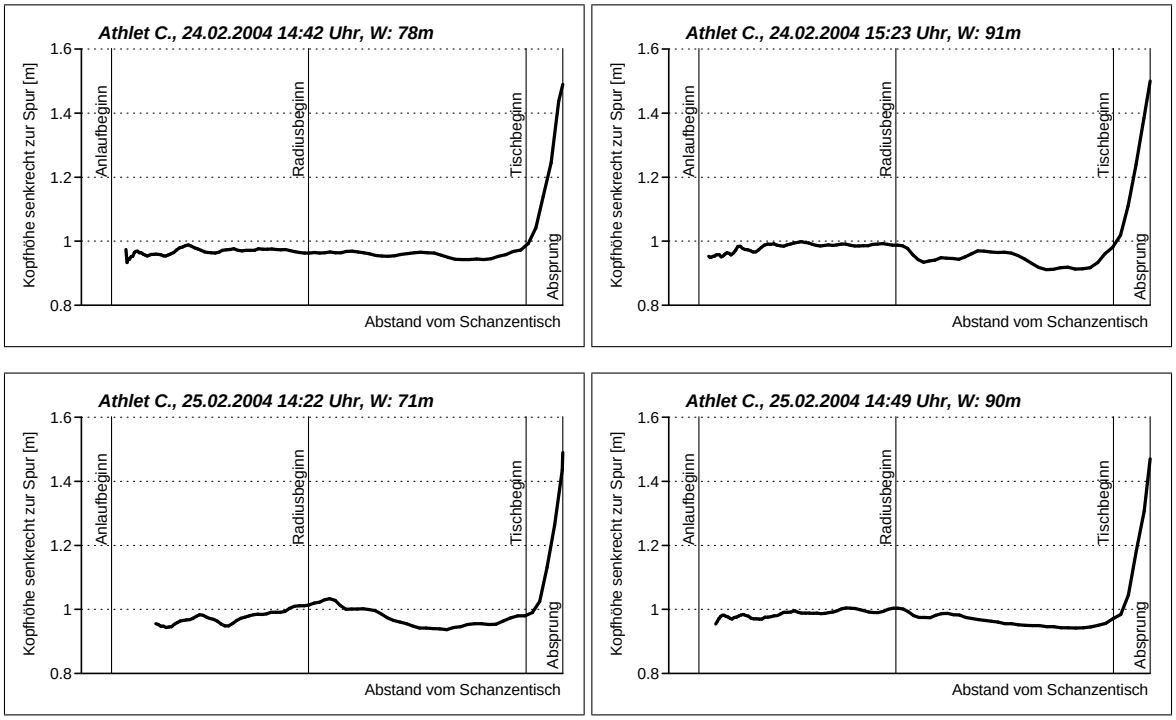

Abb. 6-2: *Anfahrtshöhe senkrecht zur Spur. Besonders oben rechts ist ein deutliches Einknicken mit anschließender Kompensation zu sehen. Links unten: die Anfahrtshocke wird im ebenen Teilstück stetig nach oben korrigiert.*

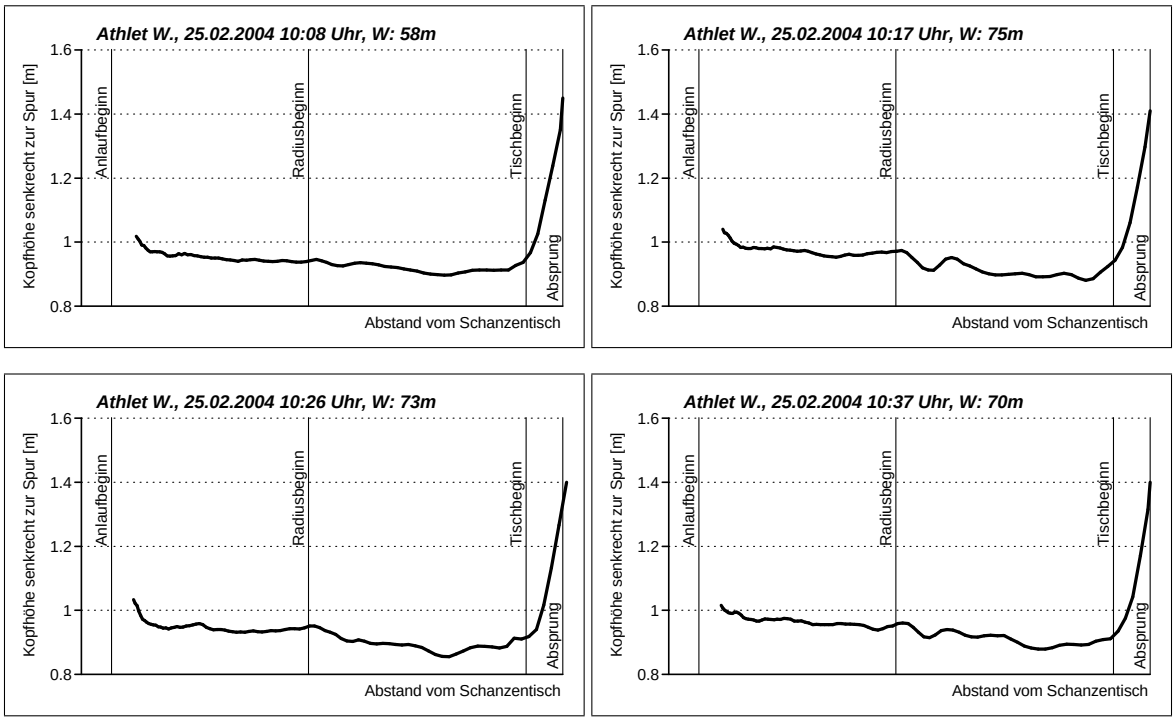

Abb. 6-3: *Anfahrtshöhe senkrecht zur Spur. Eine unterschiedlich stark ausgeprägte Einknickbewegung im Radiusbeginn ist auffällig. Diese wird versucht, auszugleichen.*

die Haltung unverändert bleiben. Mit GPS kann dies nur indirekt überprüft werden, indem der Kopfabstand von der Spur untersucht wird. Unterstellt sei hierbei, dass sich Haltungsänderungen signifikant auf die Position des Kopfes auswirken.

Dazu wird nun das vorhandene Spurprofil der Schanze betrachtet. Der Kopfabstand entspricht dann der Länge einer gedachten Lotlinie auf das Profil. Die Abbildungen 6-2 und 6-3 zeigen diesen Wert in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zur Schanzentischkante. Zur besseren Interpretierbarkeit sind Radius- und Tischbeginn angegeben. An diesen Punkten ändern sich die auf den Athleten wirkenden Kräfte, vgl. Abschnitt 5.6.

Tab. 6-3: *Kopfhöhen am Schanzentisch, Athlet C., Mittelwert 24.2.2004: 1.52 m±2 cm; Mittelwert 25.2.2004: 1.45 m±3 cm*

Datum/Zeit	**Kopfhöhe** [m]	**Anlaufgeschw.** [km/h]	**Weite** [m]
24.2.04 14:42	1,52	90,44	78
24.2.04 14:52	nicht gemessen	91,84	88
24.2.04 15:04	1,54	91,70	89
24.2.04 15:23	1,50	91,92	91
25.2.04 14:22	1,47	88,87	71
25.2.04 14:31	1,41	90,11	83
25.2.04 14:40	1,48	90,84	85
25.2.04 14:49	1,45	91,34	90

Tab. 6-4: *Kopfhöhen am Schanzentisch, Athlet W., Mittelwert: 1.40 m±2 cm*

Datum/Zeit	**Kopfhöhe** [m]	**Anlaufgeschw.** [km/h]	**Weite** [m]
25.2.04 10:08	1,42	89,47	58
25.2.04 10:17	1,41	89,62	75
25.2.04 10:26	1,37	90,03	73
25.2.04 10:37	1,38	90,12	71

Bei der Fahrt durch den Radiusbereich des Anlaufs wirkt zusätzlich zur Gewichtskraft eine geschwindigkeitsabhängige Zentrifugalkraft. Bei einigen Sprüngen ist dazu folgendes festzustellen: Nach der Einfahrt in den Radius spürt der Athlet, dass er der plötzlich wirkenden Zentrifugalkraft nachgegeben hat. Die Oberschenkelmuskulatur wird stark angespannt, um einen entsprechenden Gegendruck zu erzeugen. In den Diagrammen ist daher einige Meter später eine unterschiedlich stark ausgeprägte und nach oben gerichtete Kompensationsbewegung festzustellen (z. B. Abb. 6-2 oben rechts).

In [Schwameder und Müller 1995] wird ebenfalls von eigentlich unerwünschten Ausholbewegungen berichtet. Die aus Videobildern bestimmten mittleren Kniewinkel von 77 Grad verringern sich bis zum Absprungbeginn um ca. 4 Grad. Dieser Effekt wurde auch bei Spitzenathleten beobachtet.

Die Kurvenformen von Athlet W. (Abb. 6-3) zeigen ein kontinuierliches Einknicken des Athleten schon von Beginn an. Die vor dem Absprung eingenommene Körperhaltung ist im Vergleich zu Athlet C. deutlich tiefer. Damit steht einerseits ein längerer vertikaler Beschleunigungsweg zur Verfügung. Möglicherweise kommen hier aber Kraftdefizite beim Aufrechterhalten der Fahrposition zum Tragen. (Letzteres könnte im Labor mit Hilfe einer Maximalkraftuntersuchung der Beinstreckmuskulatur ausgeschlossen werden.)

Die Variationen der Körperhaltung während der Anfahrt liegen in der Größenordnung von unter 1 dm. Ursache für kleine Schwankungen können evtl. auch Nickbewegungen des Kopfes sein, die jedoch nur durch gleichzeitige Videoaufzeichnungen bestimmt werden können.

6.4 Kopfhöhe am Schanzentisch

Unabhängig von GPS entsteht beim Einsatz des Lichtschrankensystems *LLBA16* ein Messwert, der den Abstand des Kopfes über dem Schanzentisch darstellt. Dieser in Echtzeit ermittelte Wert wird über eine Anzeigetafel (vgl. Abb. 4-13) den Trainern als Sofortinformation bereitgestellt. In den Tabellen 6-3 und 6-4 sind die Messwerte für die Athleten C. und W. angegeben.

Bei der Interpretation ist folgendes zu beachten:

- Die Kopfhöhe am Tisch wird bestimmt durch den Grad der erreichten Körperstreckung am Messpunkt. Dabei besteht eine Abhängigkeit von der zeitlichen Koordinationsleistung und der Geschwindigkeit der Körperstreckbewegung während der Absprungphase.
- Für jeden Athleten gibt es einen individuellen optimalen Wert. Dieser kann als Mittelwert aus den besten Sprüngen bestimmt werden.
- Kleine Streuungen der individuellen Kopfhöhen deuten auf eine gute Koordinationsleistung des Athleten hin. Große Streuungen ergeben sich, wenn der Athlet zu früh oder zu spät mit seiner Körperstreckung beginnt oder die Streckbewegung von Sprung zu Sprung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit realisiert wird.

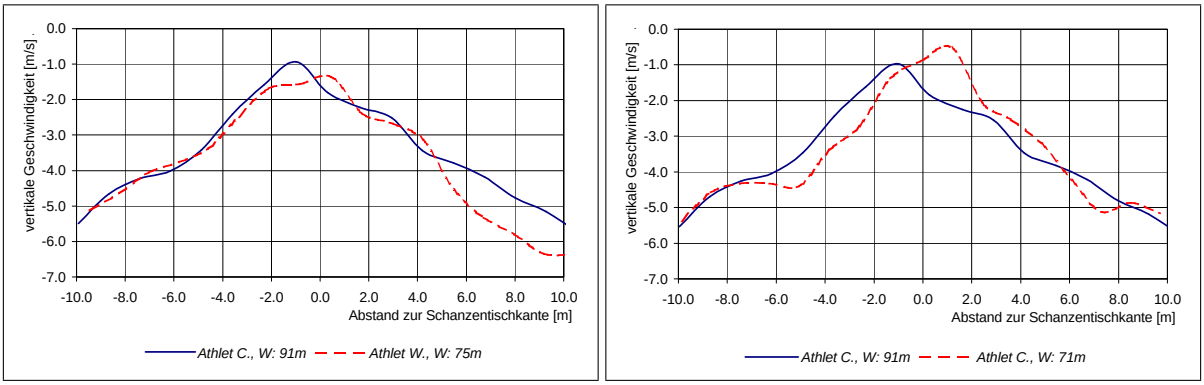

Abb. 6-4: *Vertikale Absprunggeschwindigkeiten verschiedener Sprünge bezogen auf den Kopf des Athleten (Erklärung siehe Text)*

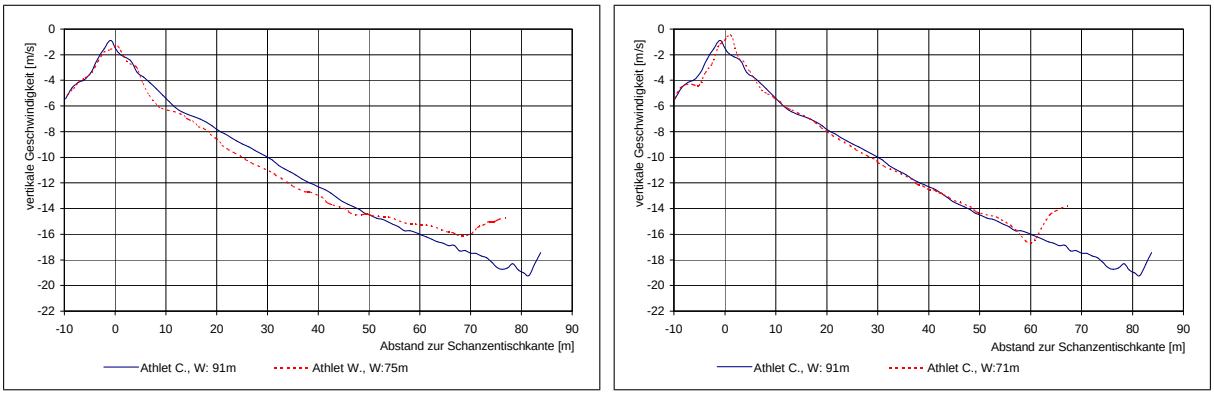

Abb. 6-5: *Vertikalgeschwindigkeiten einzelner Sprünge bezogen auf den Kopf des Athleten (Erklärung siehe Text)*

- Nach Streichung der schlechtesten Sprünge ergeben sich für Tab. 6-3 und Tab. 6-4 Korrelationskoeffizienten[9] zwischen Kopfhöhe und Weite in der Größenordnung von 0,7 bis 0,8. Dies deutet darauf hin, dass die Köpfhöhe allein noch kein signifikantes Technikmerkmal darstellt. Für genauere Aussagen hierzu werden umfangreichere Messreihen mit dokumentierten sonstigen Einflussfaktoren benötigt.

6.5 Vertikale Geschwindigkeitsprofile im Absprung-, Übergangs- und Flugbereich

Die Tische der Sprungschanzen sind rund 10 Grad nach unten geneigt. Durch die Aufstehbewegung bei Absprung verlagert sich der Körperschwerpunkt des Athleten nach oben. Dadurch wird eine Verringerung der Sinkgeschwindigkeit bewirkt. Die Tischneigung ist jedoch so groß, dass die vertikale Geschwindigkeitskomponente keine positiven Werte erreicht. In erster Näherung kann man davon ausgehen, dass die Athleten größere Vorteile haben, denen es gelingt, ihre Sinkgeschwindigkeit beim Verlassen des Schanzentischs stärker zu minimieren.

Die in der Literatur angegebenen vertikalen Absprunggeschwindigkeiten in der Größenordnung von 0,5 – 0,6 m/s sind Relativgeschwindigkeiten des Körperschwerpunkts senkrecht zur Unterstützungsfläche. Die in Abb. 6-4 dargestellten Geschwindigkeiten beziehen sich jedoch auf den Kopf des Athleten. Der Kopf als Ende der Gliederkette hat durch die Aufstehbewegung eine geringere Sinkgeschwindigkeit als der Körperschwerpunkt. Wird die aktuelle Körperhaltung aus Videobildern entnommen, kann eine Umrechnung auf den Körperschwerpunkt erfolgen.

An genau einem Punkt hat die Sinkgeschwindigkeit ihren kleinsten Betrag erreicht. Da der kontinuierliche Geschwindigkeitsverlauf mit einer diskreten Abtastrate von 20 Hz erfasst wird, ist es technisch schwer möglich, diesen Extremwert genau als Messwert zu bestimmen. Aufgrund der Kenntnis der Geschwindigkeitsverläufe sind jedoch Interpolationen möglich. Der größte Messwert ist also nicht unbedingt identisch mit der tatsächlich erreichten Vertikalgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Abtastrate kann hier zu genaueren Aussagen führen.

Im linken Diagramm der Abb. 6-4 werden die besten Sprünge der Athleten C. und W. gegenübergestellt. Die Kurven gleichen sich sehr stark bis zum Absprung (0,0 m-Marke), jedoch erreicht Athlet W. nicht so kleine Sinkgeschwindigkeiten. Bereits 6 m nach der Tischkante sinkt er 1 m/s schneller als der Vergleichsathlet. Deshalb erreicht er eine Weite, die nicht allein nur durch die um 2,3 km/h kleinere Anfahrtsgeschwindigkeit geringer ausfällt.

[9] Die berechneten Korrelationskoeffizienten sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs statistisch nicht abgesichert.

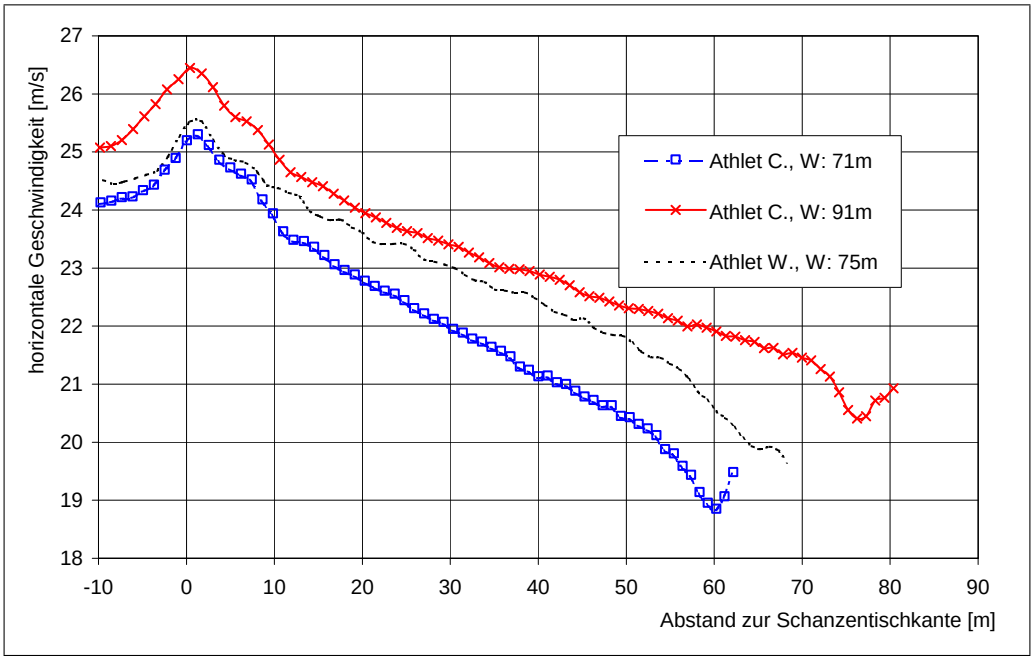

Abb. 6-6: *Verlauf der Horizontalgeschwindigkeit verschiedener Sprünge*

Tab. 6-5: *Verluste in der Horizontalgeschwindigkeit beim Übergang in die endgültige Flughaltung*

Sprung	$\mathbf{V_{-6m}}$ [km/h]	$\mathbf{V_{max}}$ [km/h]	**Diff.** $\mathbf{V_{max}}$ [km/h]	$\mathbf{V_{26m}}$ [km/h]	**Diff.** $\mathbf{V_{26m}}$ [km/h]
Athlet C., 78m	90,4	93,6	+3,2	83,2	-7,2
Athlet C., 89m	91,1	95,0	+3,9	84,6	-6,5
Athlet C., 91m	91,4	95,8	+4,4	85,0	-6,4
Athlet C., 71m	87,1	91,4	+4,3	80,3	-6,8
Athlet C., 83m	88,9	94,0	+5,1	82,4	-6,5
Athlet C., 85m	90,7	94,7	+4,0	84,2	-6,5
Athlet C., 90m	91,1	94,7	+3,6	83,9	-7,2
Athlet W., 58m	88,6	92,5	+3,9	84,2	-4,4
Athlet W., 75m	88,6	92,5	+3,9	83,5	-5,1
Athlet W., 73m	88,6	92,5	+3,9	83,9	-4,7
Athlet W., 71m	89,3	94,3	+5,0	82,4	-6,9

Das rechte Diagramm vergleicht einen nicht so gelungenen Sprung des Athleten C. mit seinem besten Sprung. Deutlich zu erkennen ist die zu spät einsetzende, aber mit höherer Geschwindigkeit ausgeführte Absprungbewegung. Dieser Effekt lässt sich auch in den Messwerten der Schanzentischdynamometrie nachweisen. Die Kraftmaxima liegen zeitlich versetzt und unterscheiden sich in ihrer Größe.

Am Messpunkt der Laser-Lichtschranke *LLBA16* ist der Kopf nur 3 cm tiefer als beim Referenzsprung. Die Sinkgeschwindigkeit wurde um 0,5 m/s stärker verlangsamt. Jedoch ist im nachfolgenden Flugabschnitt (Übergangsphase) ein schnelleres Anwachsen der Sinkgeschwindigkeit festzustellen. Damit beginnt dieser Flug unter schlechteren Voraussetzungen als der beste Sprung. Die erreichte Weite muss allerdings zusätzlich im Verhältnis zur rund 3 km/h langsameren Anfahrtsgeschwindigkeit gesehen werden.

Der Extremwert des Graphen liegt hier hinter der Schanzentischkante, da sich die Geschwindigkeiten auf den Kopf beziehen. Bei nach vorn gebeugter Haltung ist der Kopf bereits in der Luft, der Knöchelpunkt aber noch auf dem Schanzentisch. Die Körperhaltung ändert sich während eines Sprungs stark, sodass sich kein konstanter horizontaler Offset zwischen Knöchel, Körperschwerpunkt und Kopf ergibt.

Abb. 6-5 zeigt die vertikalen Geschwindigkeitsverläufe der kompletten Sprünge. Im linken Bild werden Unterschiede deutlich, die auf verschiedene Springer und Sprungstile zurückzuführen sind. Vergleicht man Sprünge eines Athleten miteinander (rechts), sind nur geringe Differenzen im Verlauf der Vertikalgeschwindigkeit zu erkennen, auch dann, wenn der Weitenunterschied 20 m beträgt.

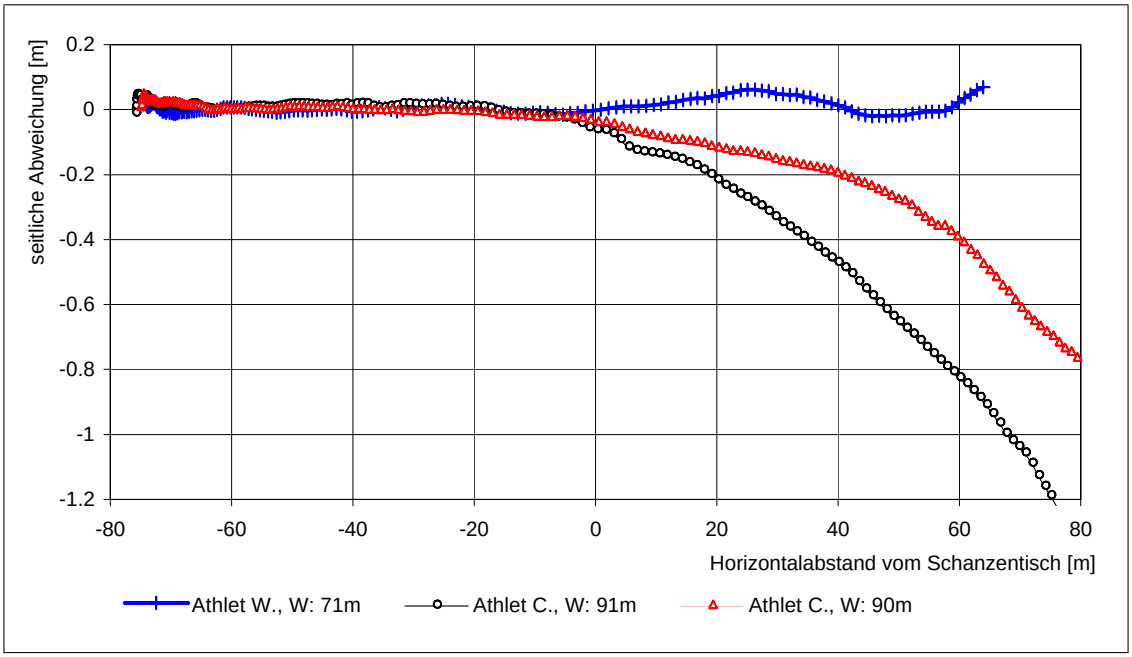

Abb. 6-7: *Seitliche Abweichung von der Spur. Die Ordinaten-Null-Linie entspricht der Spur.*

6.6 Horizontale Geschwindigkeitsprofile

Abb. 6-6 stellt horizontale Geschwindigkeitsverläufe für drei verschiedene Sprünge dar. Dabei sind zuerst die unterschiedlich hohen Anfahrtsgeschwindigkeiten festzustellen. Zweitens belegen die Graphen, dass durch die Absprungbewegung nicht nur ein vertikaler, sondern auch ein horizontaler Geschwindigkeitszuwachs erzielt wird. Drittens zeigen alle untersuchten Geschwindigkeitsprofile im Bereich 0 – 4 m einen Geschwindigkeitsverlust von ca. 1 m/s.

Wichtig für einen weiten Sprung ist, dass möglichst viel des beim Absprung erzielten Zuwachses an Horizontalgeschwindigkeit mit in die Flugphase übernommen wird. Hier sollten zukünftige Untersuchungen ansetzen, um die Abhängigkeiten zwischen Bewegungsablauf in den ersten Flugmetern und den dabei auftretenden Geschwindigkeiten zu analysieren.

Tab. 6-5 zeigt die momentane Horizontalgeschwindigkeit 6 m vor dem Absprung (V_{-6m}), das Geschwindigkeitsmaximum (V_{max}) sowie die Geschwindigkeit nach 26 m (V_{26m}), wobei der Wert 26 m frei gewählt wurde. Spalte 4 stellt den Geschwindigkeitsgewinn durch die Absprungbewegung dar. In der letzten Spalte sind die effektiven Geschwindigkeitsverluste in Bezug auf V_{-6m} angegeben. Der effektive Geschwindigkeitsverlust ist umso geringer, je besser der Absprung ausgeführt wird. Es ist ersichtlich, dass Athlet C. im Mittel 6,7 km/h verliert. Athlet W. hingegen gelingt es, mit nur 5,3 km/h mittlerem Geschwindigkeitsverlust mehr Fahrt mit in die Flugphase zu nehmen.

6.7 Seitliche Auslenkung in der Flugphase

Symmetrieaspekte im Skispringen sind in der Literatur bisher kaum beachtet worden. Schwameder und Müller [1995] haben Untersuchungen in dieser Richtung durchgeführt. Analysiert man die Testsprünge in der Horizontalebene, so lassen sich seitliche Auslenkungen aus der durch die Anlaufrichtung vorgegebenen Geraden darstellen. Im Anlaufbereich ist dies auf eine nicht symmetrische Anfahrtshaltung zurückzuführen. Beim Absprung kann ungleicher Krafteinsatz beider Beine und Arme dazu führen, dass der wirkende Impuls seitlich gerichtet ist. In der Folge bewegt sich der Athlet also nicht auf der Symmetrieachse. Abb. 6-7 zeigt diesen Sachverhalt an drei ausgewählten Sprüngen.

Während der Flugphase kommen durch Seitenwind verursachte Krafteinwirkungen hinzu. Driftet ein Athlet trotz unterschiedlicher Windverhältnisse bei jedem Sprung immer in die gleiche Richtung, ist ungleicher Krafteinsatz beim Absprung als Ursache allerdings sehr wahrscheinlich. Dieser Effekt könnte auch mit Hilfe dynamometrischer Absprungmessungen nachgewiesen werden. Dazu müssten aber für das linke und rechte Bein getrennt arbeitende Messplattformen eingesetzt werden.

Eine weitere Ursache für seitliche Driftbewegungen können ungleiche Rechts-Links-Öffnungswinkel bei der V-Stellung der Skier sein. Von Schwameder und Müller [1995] werden durchschnittliche Differenzen von rund 5 Grad genannt. In einem Fall wurden 16,5 Grad nachgewiesen. Eine asymmetrische Skihaltung ruft auch einen zusätzlichen Turbulenzwiderstand hervor, der sich negativ auf die Sprungweite auswirkt.

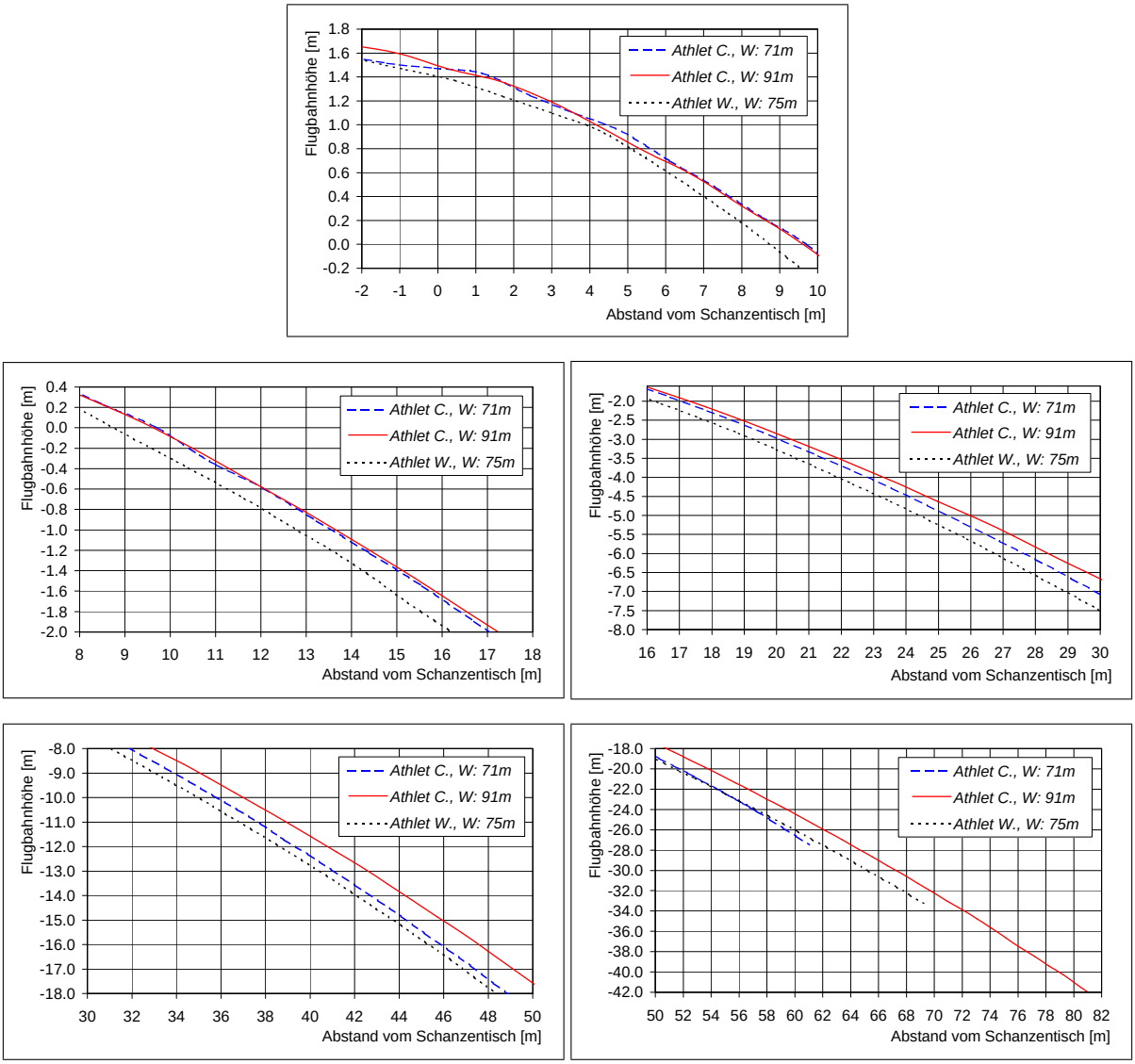

Abb. 6-8: *Vergleich der Flugbahnhöhen verschiedener Sprünge. Bezugspunkt ist die Schanzentischkante.*

Die schräg verlaufende Flugbahn bedingt eine kürzere Weite. Die mittlere Breite im Aufsprungbereich beträgt rund 20 m. Ein 100 m-Sprung kann also maximal um 5,7 Grad seitlich versetzt verlaufen. Damit ergibt sich ein Weitenunterschied zu einem gerade verlaufenden Sprung von 0,5 m. Praktisch sind die Unterschiede sehr viel geringer, denn kein Springer steuert so gefährlich nahe an die Seitenbegrenzung des Aufsprunghangs.

6.8 Vergleich der Flugbahngeometrie

In Abb. 6-8 sind die Flugbahnhöhen von drei ausgewählten Sprüngen dargestellt. Dabei sind Unterschiede zwischen beiden Athleten erkennbar, die auf unterschiedliche technische Ausgestaltung des Absprungs hindeuten. Die Profilkurve ”Athlet C., W: 71 m” zeigt, wie sich der flache Absprung in der Übergangsphase fortsetzt. Dabei kann festgestellt werden, dass die Flugbahn zumindest stückweise leicht nach vorn parallel versetzt zum besten Sprung verläuft.

Nach ca. 10 Flugmetern ist dieser Vorsprung jedoch aufgebraucht. In den darauf folgenden Abschnitten verlaufen die Flugbahnen unauffällig. Am Landepunkt von ”Athlet C., W:71 m” ergeben sich die in Tab. 6-6 angegebenen Geschwindigkeiten.

In der letzten Tabellenspalte ist das Verhältnis zwischen Horizontal- und Sinkgeschwindigkeit angegeben. Ab einem bestimmten Wert, der auch über die wirkenden Auftriebs- und Luftwiderstandskräfte Auskunft gibt, beenden die Athleten den Sprung. Je weiter der Sprung nach unten gezogen werden kann, desto größer wird die Verhältniszahl. Abb. 6-9 zeigt den prinzipiellen Verlauf des Verhältnisses von Horizontal- zu Vertikalgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Schanzentisch.

Tab. 6-6: *Momentangeschwindigkeiten im Landepunkt*

Sprung	$V_{horizontal}$ [km/h]	$V_{vertikal}$ [km/h]	V_{gesamt} [km/h]	Verhältnis $V_{horizontal}/V_{vertikal}$
		Momentangeschwindigkeiten am Landepunkt "Athlet C., 71m"		
Athlet C., 71m	67,6	-59,7	90,2	-1,13
Athlet W., 75m	73,0	-55,6	91,8	-1,31
Athlet C., 91m	78,1	-59,6	98,2	-1,31
		Momentangeschwindigkeiten am Landepunkt "Athlet W., 75m"		
Athlet W., 75m	70,7	-58,9	92,1	-1,20
Athlet C., 91m	73,6	-67,2	99,7	-1,28

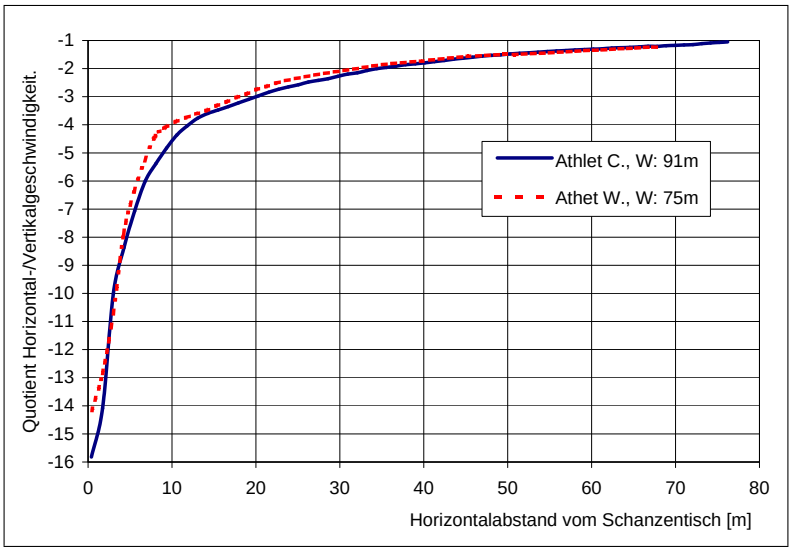

Abb. 6-9: *Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalgeschwindigkeit*

Gelänge es einem Athleten, durch Einnahme einer zweckmäßigen Flughaltung in jedem einzelnen Flugabschnitt das Ansteigen dieses Parameters zu verlangsamen, könnte eine größere Weite erreicht werden. Anhand von Windkanalmessungen sollte theoretisch untersucht werden, ob jeder Flug bei Erreichen eines bestimmten Grenzwertes beendet werden muss, sofern der Athlet keinen Sturz erleiden will. Mit Hilfe von GPS-basierten Geschwindigkeitsmessungen kann in der Praxis nachgewiesen werden, bei welchem Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalgeschwindigkeit der Flug tatsächlich beendet wurde. Somit könnten sich eventuell vorhandene Leistungsreserven aufdecken lassen.

Bei den theoretischen Untersuchungen sollte die Rotationsbewegung des Systems Skispringer nicht vernachlässigt werden, da weiter nach unten gezogene Sprünge mit größerer Vorlage verbunden sind. Deshalb wird es, besonders auch unter Beachtung des flacher werdenden Landeprofils immer schwieriger, den Sprung sturzfrei zu beenden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dank der immer kleiner und leistungsfähiger gewordenen GPS-Empfänger ergaben sich in den letzten Jahren neue Einsatzmöglichkeiten für satellitengestützte Positionierungsverfahren. Nicht nur die Vielfalt klassischer Navigationsanwendungen hat sich erhöht, in der Literatur wird von ersten Anwendungen auch im Bereich der Sportwissenschaft berichtet. Der Grundgedanke dieser Arbeit lag darin begründet, Flugbahnen und Geschwindigkeiten von Skispringern mit Hilfe von geodätischen GPS-Messungen direkt zu bestimmen. Bisherige Untersuchungen nutzen dafür meist kinemetrische Verfahren, die einen relativ hohen Aufwand mit sich bringen, wenn größere räumliche Bereiche wie z. B. Schanzen oder Skipisten erfasst werden müssen.

Ein ideales Messsystem zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass keine störenden Rückwirkungen auf den Athleten existieren. Nach dieser Zielvorgabe und mit den eigenen Erfahrungen aus Voruntersuchungen wurde ein GPS-Empfänger entwickelt, der komplett in einen Sprunghelm integriert werden konnte. Damit entfallen störende Kabelverbindungen, wie sie in einer älteren Version noch notwendig waren. Dort wurde der Empfänger in einer Tasche unter dem Sprunganzug getragen. Nur die Antenne befand sich im Sprunghelm.

Die technische Realisierung des GPS-Helms erforderte jedoch Anpassungsarbeiten, da käuflich zu erwerbende Fertigkomponenten nicht den Vorgaben an Masse, Funktionalität und Volumen entsprachen. Aufgrund entsprechender Kenntnisse wurde die komplette Steuerelektronik vom Autor selbst entwickelt und hergestellt.

Die topographische Lage von Sprungschanzen hat typischerweise größere Abschattungen der Satellitensignale zur Folge. Daher sind GPS-Messungen nicht auf jeder Schanze und zu jeder beliebigen Tageszeit möglich. Die Anzahl gleichzeitig beobachtbarer Satelliten ist vergleichsweise gering. GPS beim Skispringen stellt somit eine Anwendung im Grenzbereich des Positionierungssystems dar.

Um zentimetergenaue Positionen berechnen zu können, müssen die Trägerphasenmehrdeutigkeiten bestimmt und ganzzahlig festgesetzt werden. Mit gängigen Softwarepaketen gelingt dies aber nur bedingt, da die meisten GPS-Berechnungsalgorithmen von der Verfügbarkeit ausreichend langer und unterbrechungsfreier Messungen ausgehen, die mit den 10 –20 Sekunden Daten für Anlauf, Absprung, Flug und Landung jedoch nicht vorliegen. Eine künstliche Verlängerung der Messdauer ist nicht praktikabel. Der Trainingsablauf würde sich dadurch unzumutbar verzögern.

Um unter den erschwerten Rahmenbedingungen beim Skispringen dennoch Zentimetergenauigkeit erreichen zu können, wurde ein neuartiges Messgerät entwickelt. Mit dem laserbasierten Lichtschrankensystem *LLBA16* kann der Durchgang des Messhelms durch eine Referenzebene am Schanzentisch gemessen werden. Die so ermittelten Positions- und Zeitinformationen werden als Passpunkt in die Software zur Mehrdeutigkeitslösung eingeführt. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung erhöht sich dadurch. Die aus diesen relativ kurzen Messreihen berechneten Koordinatenlösungen erreichen Zentimetergenauigkeit. Auch dieses Messgerät wurde vom Autor konstruiert und als Prototyp gefertigt.

Im Rahmen von Trainingslehrgängen wurden GPS-Messungen gemeinsam mit kinemetrischen und dynamometrischen Untersuchungen durchgeführt. Anhand dieser Daten wurde dargelegt, welche vielfältigen Informationen in Geschwindigkeits- und Ortskurven für Anlauf-, Absprung- und Flugphase enthalten sind. GPS-Positionen allein sind jedoch nicht ausreichend für die sport- und trainingswissenschaftlich relevanten Fragestellungen. Da nur eine Antenne und somit nur ein Messpunkt am Athleten vorhanden ist, können zwar Aussagen zum Bewegungsverhalten, nicht aber zur Körperhaltung und deren zeitlichen Änderung getroffen werden. Das vorgestellte Verfahren ist daher als zusätzliche Informationsquelle zu sehen.

Derzeit werden Messverfahren mit Sensoren am Athleten oder Sportgerät einerseits und berührungslose Systeme, wie z. B. kinemetrische Verfahren andererseits eingesetzt. Ein Vorteil der Kinemetrie ist die Unabhängigkeit vom Athleten, d. h., bei Wettkämpfen kann auch die Leistung der Konkurrenz analysiert werden. Dies ist mit sensorbasierten Verfahren am Messobjekt nicht möglich. Dennoch haben auch diese Systeme ihre Berechtigung, denn nicht alle Parameter lassen sich aus der Ferne messtechnisch erfassen.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Verfahren demonstriert die technischen Möglichkeiten von Satellitenpositionierungsverfahren in Kombination mit externen Zusatzinformationen. Sollen die abgeleiteten Informationen für Trainer, Athleten und Wissenschaftler in breiterem Umfang als bisher verfügbar sein, wird eine Weiterentwicklung des Verfahrens empfohlen:

Die relativ komplexe Auswertung der Messgrößen unterschiedlicher Sensoren erfordert einen durchgehend automatisierten Datenfluss. Mit vernetzten Sensoren wäre es möglich, zeitnahe Ergebnisse präsentieren zu können. Schnelle Rückmeldungen zu den Athleten und Trainern wirken sich positiv auf den Trainingsprozess aus. Solche Echtzeitimplementierungen sind bereits für die Kinemetrie und Schanzentischdynamometrie im Einsatz.

Denkbar wäre eine gerätetechnische Weiterentwicklung unter Einsatz von Sensoren anderer physikalischer Messprinzipien. Zeitlich hochauflösende Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsmesser z. B. sind seit einigen Jahren auch im moderaten Preissegment mit geringen baulichen Abmessungen verfügbar. Für Anwendungen im Sport ist die Kurz-

zeitstabilität der Sensoren durchaus ausreichend. Bei integrierten Messsystemen würden gemessene GPS-Positionen als Stützinformationen einfließen. Hiermit ließe sich nicht nur eine bessere zeitliche Auflösung bewirken, sondern auch die Drehbewegung des Kopfes erfassen.

Um nicht nur die Position und Geschwindigkeit, sondern auch die Ausrichtung von Athleten oder Sportgeräten im Raum zu bestimmen, könnten alternativ zur Inertialsensorik mehrere verteilte GPS-Empfangssysteme parallel eingesetzt werden, wenn dadurch keine negativen Rückwirkungen auf den Athleten entstehen. Der Trend geht klar hin zu immer kleineren, leichteren und leistungsfähigeren Empfangssystemen.

Zum Schluss sei noch auf das im Aufbau befindliche europäische Satellitennavigationssystem GALILEO hingewiesen. Zukünftige GPS-Empfänger sollen in der Lage sein, beide Systeme nutzen zu können. Dadurch erhöht sich die Anzahl verfügbarer Satelliten. Auch wenn in Gebieten mit starken Abschattungen die geometrischen Einflussfaktoren weiterhin ungünstig bleiben, so könnten dort Positionen messbar sein, wo heute kein ausreichender Signalempfang vorhanden ist. Aus Sicht der Anwender werden sich dadurch deutliche Verbesserungen in der Verfügbarkeit ergeben.

Literatur

[Arndt u. a. 1995] ARNDT, Anton und BRÜGGEMANN, Gert-Peter und VIRMAVIRTA, Mikko und KOMI, Paavo: Techniques used by Olympic Ski Jumpers in the Transition from Takeoff to early Flight. In: *Journal of Applied Biomechanics* 11 (1995), S. 224 – 237 13, 21

[Atmel 2002] ATMEL CORPORATION: *ATMega128 Specifications*. 2002. – URL http://www.atmel.com 35, 38, 40

[Augath u. a. 2002] AUGATH, Wolfgang und BLUMENBACH, Thomas und WILDT, Steffen: Qualitätssicherung bei Referenzstationen und in Referenzstationsnetzen. In: *Tagungsband zum SAPOS-Symposium*, 2002, S. 114 – 123. – Hannover, 21.-23. Mai 2002 43

[Bauer 1997] BAUER, Manfred: *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. 4. völlig überarbeitete Auflage. Wichmann Verlag Heidelberg, 1997 26

[Baumann 1990] BAUMANN, Christina: Zur Genauigkeit von Videobildmeßverfahren im Vergleich zum Fimbildmeßverfahren. In: *Training und Wettkampf* 28 (1990), Nr. 8, S. 139 – 157 13

[Blumenbach und Henke 2001] BLUMENBACH, Thomas und HENKE, Thomas: Anwendungen von DGPS in der Sportwissenschaft. In: *Tagungsband POSNAV 2001 DGON Symposium Positionierung und Navigation 2001 Dresden*, 6.-8. März 2001, S. 247 – 254 11

[Cosentino und Diggle 1996] COSENTINO, R. J. und DIGGLE, D. W.: *Differential GPS*. S. 321 – 383. In: KAPLAN, Elliot D. (Hrsg.): *Understanding GPS: principles and applications*, Artech House, Inc., 1996 27

[Cutter 1994] CUTTER, David A.: *Nordic Ski Jumping Aerodynamics*. AIAA 94-0008 Technical Paper, 32nd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV. 10.-13. Januar 1994 11

[Drenk und Hildebrand 1999] DRENK, Volker und HILDEBRAND, Falk: Simultane Bildmessung und Nutzung virtueller Körpermodelle. In: *Zeitschrift für Andgewandte Trainingswissenschaft* 6 (1999), Nr. 2, S. 69 – 86 13, 14

[Energizer 2003] EVEREDY BATTERY CO.: *Engineering datasheet ENERGIZER No. 2CR5 (EL2CR5)*. 2003. – URL http://www.energizer.com 36

[FIS 2000] INTERNATIONALER SKIVERBAND FIS: *Specifications for Competition Equipment 2000/2001*. 2000. – URL http://www.fis-ski.com 34, 51

[FIS 2001] INTERNATIONALER SKIVERBAND FIS: *Grundlagen für die Projektierung einer Skisprungschanze*. 2001. – URL http://www.fis-ski.com 22, 62

[Frischholz und Spinnler 1993] FRISCHHOLZ, Robert und SPINNLER, Klaus: *A class of Algorithms for Real-Time Subpixel Registration*. Paper presented on Europto Conference, München. 1993 14

[Gorisek 1993] GORISEK, Lado: Der Bau von Ski-Sprungschanzen unter dem besonderen Aspekt des V-Stils. In: *Sportstättenbau und Bäderanlagen* 26 (1993), Nr. 1, S. 51 – 54 22

[Hatch und Euler 1994] HATCH, Ronald und EULER, Hans-Juergen: Comparison of Several AROF Kinematic Techniques. In: *Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, Institute of Navigation, 1994, S. 363 – 370 28

[Hochmuth 1981] HOCHMUTH, Gerhard: *Biomechanik sportlicher Bewegungen*. 4. stark bearbeitete Auflage. Sportverlag Berlin, 1981 18, 20, 59

[Hofmann-Wellenhof u. a. 2001] HOFMANN-WELLENHOF, B. und LICHTENEGGER, H. und COLLINS, J.: *Global Positioning System Theorie and Practice*. 5th, rev. edition. Springer-Verlag Wien New York, 2001 23, 24, 28

[Hubbard u. a. 1989] HUBBARD, M. und HIBBARD, R. L. und YEADON, M. R. und KOMOR, A.: A Multisegment Dynamic Model of Ski Jumping. In: *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (1989), S. 258 – 274 11, 17

[Jin u. a. 1995] JIN, Hiroshi und SHIMIZU, Shunsuke und WATANUKI, Tadaharu und KUBOTA, Hirotoshi und KOBAYASHI, Kazutoshi: Desirable Gliding Styles and Techniques in Ski Jumping. In: *Journal of applied Biomechanics* 11 (1995), Nr. 4, S. 460 – 474 17

[Kaps u. a. 1996] KAPS, P. und SCHWAMEDER, H. und ENGSTLER, C.: Inverse Dynamic Analysis of Take-Off in Ski-Jumping. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Science and Skiing*, 1996, S. 73 – 87 21

[Kim und Langley 2000] KIM, Donghyun und LANGLEY, Richard B.: GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues. In: *Proceedings of the 7th GNSS Workshop – International Symposium on GPS/GNSS, Seoul, Korea*, 30.11.–2.12. 2000, S. 213 – 221 23, 28

[Kindler 1993] KINDLER, Matthias: *Videoweitenmessung im Skispringen*. 1993. – Ausgewählte Arbeitsergebnisse des Jahres 1993, Institut für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig, S. 58–62 61

[Kistler 2004] KISTLER INSTRUMENTE GMBH: *Datenblätter verschiedener Kraftmessplattformen*. 2004. – URL http://www.kistler.com 14

[Komi 1996] KOMI, P. V.: Ski-Jumping Take-Off Performance: Determining Factors and Methodological Advances. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Science and Skiing*, 1996, S. 3 – 26 15

[Komi u. a. 1974] KOMI, Paavo und NELSON, Richard und PULLI, Matti: Biomechanik des Skisprungs. In: *Leistungssport* 4 (1974), Nr. 6, S. 431 – 450 12

[Ladetto u. a. 2000] LADETTO, Q. und GRÜNIG, S. und MERMINOD, B. und TERRIER, P. und SCHUTZ, Y.: GNSS hits the slopes. In: *Galileo's World* spring (2000), S. 14 – 23 10

[Leick 1995] LEICK, Alfred: *GPS Satellite Surveying*. 2nd. edition. John Wiley & Sons, Inc., 1995 23

[Lichtenegger u. a. 1997] LICHTENEGGER, Herbert und BACIC, Zeljko und CHENG, Pengfei: Application of DGPS for the establishment of ski racetrack data bases. In: *Proceedings of the International Symposium on GIS/GPS, Istanbul*, 15.-18. September 1997 10, 11

[Luhtanen u. a. 2000] LUHTANEN, Pekka und KIVEKÄS, Juha und PULLI, Matti: Influence of a ski-jumper model, skis and suits on aerodynamical characteristics in ski jumping. In: HONG, Y. (Hrsg.) und JOHNS, D.P. (Hrsg.): *Proceeding of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports* Bd. 2, 2000, S. 541 – 544 22

[Mahnke u. a. 2002] MAHNKE, R. und MROSS, H. und MÜLLER, S.: Entwicklungstendenzen im Skispringen im Olympiazyklus 1998-2002. In: *Zeitschrift für angewandte Trainingswissenschaft* 9 (2002), Nr. 1, S. 58 – 77 21

[Mahnke 1990] MAHNKE, Rolf: Die Anwendung der Computersimulation im Skispringen zur Ermittlung zweckmäßiger Flughaltungen. In: *Training und Wettkampf* 28 (1990), Nr. 2/3, S. 148 – 165 17

[Mahnke und Mroß 1995] MAHNKE, Rolf und MROSS, Horst: Analyse zur sportlichen Technik im Skispringen bei den Olympischen Spielen 1994 in Lillehammer und deren Entwicklung im Zeitraum von 1991 bis 1994. In: *Schriftenreihe zur angewandten Trainingswissenschaft* 2 (1995), Nr. 3, S. 8 – 28 11, 58

[Marasović 2003] MARASOVIĆ, K.: Visualised Interactive Computer Simulation of Ski-Jumping. In: *Proc. of 25th International Conference Information Technology Interfaces ITI*, 2003. – Cavtat, Kroatien, 16.-19. Juni 2003 11

[Miller 2001] MILLER, Casey C.: Real-Time GPS-Based Track and Cross Training Evaluation System. In: *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2001, S. 3086 – 3094 10

[Müller 1996] MÜLLER, W.: Biomechanics of Ski-Jumping – Scientific Jumping Hill Design. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Science and Skiing*, 1996, S. 36 – 48 22

[Müller u. a. 1996] MÜLLER, W. und PLATZER, D. und SCHMÖLZER, B.: Dynamics of Human Flight on Skis: Improvements in Safety and Fairness in Ski Jumping. In: *J. of Biomechanics* 29 (1996), Nr. 8, S. 1061 – 1068 22

[Mroß und Mahnke 1994] MROSS, H. und MAHNKE, R.: Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen zur V-Technik im Skisprung. In: *Schriftenreihe zur angewandten Trainingswissenschaft* 1 (1994), Nr. 2, S. 67 – 86 11, 22

[Neumaier u. a. 1997] NEUMAIER, A. und BABIEL, S. und GEIST, J. und RIEDER, M. und SCHARFENBERG, A. und MESTER, J.: Aspekte des Techniktrainings im Skisprung. In: NITSCH, J. (Hrsg.) und NEUMAIER, A. (Hrsg.) und DE MARÉES, H. (Hrsg.) und MESTER, J. (Hrsg.): *Techniktraining - Beiträge zu einem interdisziplinären Ansatz*, Schriftenreihe des Bundesinstituts für Sportwissenschaft, Band 94, 1997, S. 369 – 434 11, 16, 51

[NovAtel 2003] NOVATEL INC.: *OEM4 Family of Receivers – User Manual Vol. 1 and 2*. 2003. – URL http://www.novatel.com 36, 51

[Remizov 1984] REMIZOV, Ludwig P.: Biomechanics of optimal Flight in Ski-Jumping. In: *Journal of Biomechanics* 17 (1984), Nr. 3, S. 167 – 171 17

[SanDisk 2002] SANDISK CORPORATION: *CompactFlash Memory Card Product Manual*. 2002. – URL http://www.sandisk.com 41

[Saziorski u. a. 1984] SAZIORSKI, W. M. und ARUIN, A. S. und SELUJANOW, W. N.: *Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates*. 1. Auflage. Sportverlag Berlin, 1984 14

[Schmölzer und Müller 2002] SCHMÖLZER, Bernhard und MÜLLER, Wolfram: The importance of beeing light: aerodynamic forces and weight in ski jumping. In: *Journal of Biomechanics* 35 (2002), S. 1059 – 1069 11, 22

[Schwameder und Müller 1995] SCHWAMEDER, H. und MÜLLER, E.: Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen. In: *Spectrum der Sportwissenschaft* 7 (1995), Nr. 1, S. 5 – 36 16, 21, 58, 64, 67

[Schwameder und Müller 2001] SCHWAMEDER, Hermann und MÜLLER, Erich: Biomechanics in Ski Jumping: A Review. In: *European Journal of Sport Science* 1 (2001), Nr. 1, S. 38 – 50 11

[Seifriz 2001] SEIFRIZ, Florian: *Simulation im alpinen Skirennsport – Ein Modell zur Analyse der biomechanischen Einflussgrößen und Optimierung der Fahrlinie auf realen Rennpisten mit Genetischen Algorithmen*. dissertation.de – Verlag im Internet GmbH, 2001 19

[Spilker Jr. und Parkinson 1996] JAMES J. SPILKER JR. AND BRADFORD W. PARKINSON: *Overview of GPS Operation and Design*. S. 29 – 56. In: PARKINSON, Bradford W. (Hrsg.) und JR., James J. S. (Hrsg.): *Global Positioning System: Theory and Applications*, 1996 (Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 1) 23

[Straumann 1926] STRAUMANN, Reinhard: Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik (Teil 1). In: *Ski* 20 (1926) 17

[Terrier u. a. 2000] TERRIER, Philippe und LADETTO, Quentin und MERMINOD, Bertrand und SCHUTZ, Yves: High-precision satellite positioning system as a new tool to study the biomechanics of human locomotion. In: *Journal of Biomechanics* 33 (2000), Nr. 12, S. 1717 – 1722 10

[Teunissen 1996] TEUNISSEN, Peter J. G.: *Lecture notes in earth science*. Bd. 60: *GPS carrier phase ambiguity fixing concepts*. S. 175 – 217. In: *GPS for Geodesy* Bd. 60, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996 27

[Teunissen u. a. 1996] TEUNISSEN, Peter J. G. und DE JONGE, P. J. und TIBERIUS, C. C. J. M.: The Volume of the GPS Ambiguity Search Space and its Relevance for Integer Ambiguity Resolution. In: *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, Institute of Navigation, 1996, S. 889 – 907 28

[Teunissen und Kleusberg 1996] TEUNISSEN, Peter J. G. und KLEUSBERG, Alfred: *Lecture notes in earth science*. Bd. 60: *GPS Observation Equations and Positioning Concepts*. In: KLEUSBERG, Alfred (Hrsg.) und TEUNISSEN, Peter J. G. (Hrsg.): *GPS for Geodesy* Bd. 60, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996 32

[Torge 2001] TORGE, Wolfgang: *Geodesy*. 3rd completely rev. and extended ed. Walter de Gruyter Berlin, 2001 18

[Traco 2001] TRACO ELECTRONIC AG: *DC/DC-Konverter TSI 10N Serie*. 2001. – URL `http://www.tracopower.com` 36

[Virmavirta und Komi 2001] VIRMAVIRTA, M. und KOMI, P.: Factors influencing the ”Explosiveness” of Ski Jumping Take-Off. In: MÜLLER, E. (Hrsg.): *Science and Skiing II*, 2001, S. 14 – 29 11, 16

[Virmavirta u. a. 2001] VIRMAVIRTA, Mikko und PERTTUNEN, Jarmo und KOMI, Paavo V.: EMG activities and planar pressures during ski jumping take-off on three different sized hills. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* 11 (2001), S. 141 – 147 16

[Wagner 2003] WAGNER, Jörg F.: *Zur Verallgemeinerung integrierter Navigationssysteme auf räumlich verteilte Sensoren und flexible Fahrzeugstrukturen*. VDI-Verlag Düsseldorf, 2003 11

[Wanninger 1994] WANNINGER, Lambert: *Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Bd. 201, 1994 24

[Wanninger 1996] WANNINGER, Lambert: Präzise GPS-Positionierung in regionalen Netzen permanenter Referenzstationen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 121 (1996), S. 441 – 454 24

[Wübbena 1991] WÜBBENA, Gerhard: *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Bd. 168, 1991 24

[Xu 2003] XU, Guochang: *GPS Theory, Algorithms and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003 29

[Yeadon 1989] YEADON, Maurice R.: A Method for Obtaining Three-Dimensional Data on Ski Jumping Using Pan and Tilt Cameras. In: *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (1989), S. 238 – 247 13

[Zhang u. a. 2003] ZHANG, K. und GRENFELL, R. und DEAKIN, R. und LI, Y. und ZHANG, J. und HAHN, A. und GORE, C. und RICE, T.: Towards a Low-Cost, High Output Rate, Real-Time GPS Rowing Coaching and Training System. In: *Proc. of the 16th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2003, S. 489 – 498 10