

Terrainanalysen im alpinen Skisport – Einsatz von Geoinformationstechnologien und Simulationsmodellen

Alexander KRÄMER, Ralf ROTH, Florian SEIFRIZ und Jochen MESTER

1 Einleitung

Die Entwicklungen im alpinen Skisport schreiten immer weiter voran. Neben den gestiegenen Anforderungen an Trainer und Athleten im Leistungssektor, werden auch an die FIS und die Betreiber von Weltcupstrecken immer neue und komplexere Anforderungen gestellt. In Bezug auf das Training steht neben dem Technik- und Konditionsbereich vor allem die Taktikwahl im Vordergrund. Für die FIS und die Streckenbetreiber sind z.B. Sicherheitsfragen, Homologierungskriterien und Präsentationsmöglichkeiten von großer Bedeutung. Gleichzeitig wird z.B. auch die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Großveranstaltungen und die Erhebung, Verwaltung und Analyse der umfassenden lagebezogenen Daten für jeden Veranstaltungsort immer wichtiger.

All diese Fragestellungen erfordern den Einsatz neuester Technologien, wie sie Geographische Informationssysteme (GIS), Simulationsmodelle (Fahrlinienmodelle) und die satellitengestützte Navigation und Positionsbestimmung mittels GPS (Global Positioning System) darstellen.

Da deren Anwendung bislang im Bereich des alpinen Skisports nur wenig verbreitet ist, hat sich am Institut für Natursport und Ökologie der Deutschen Sporthochschule in Köln eine interdisziplinäre Forschergruppe, in enger Kooperation mit dem Institut für Trainings- und Bewegungslehre, dem Thema der Terrainanalysen im alpinen Skisport angenommen. Hierbei kommen die oben genannten Geoinformationstechnologien (GIS, GPS) und Simulationsmodelle zum Einsatz.

2 Projektziele

Ziel des Projekts ist zum einen eine umfassende Analyse von Geländeparametern (Hängeigenschaften) im Hinblick auf Homologierungs- und Sicherheitsfragen und der Aufbau einer umfassenden Datenbank für Weltcup-Strecken. Hierzu werden verschiedene Weltcupstrecken vermessen und einer statistischen Analyse unterzogen. Zum anderen bildet die Berechnung und Visualisierung optimierter Fahrlinien von Skifahrern sowohl für Trainings-, als auch für Präsentationszwecke einen Schwerpunkt. Daneben sollen auch für die Medien Präsentationsmöglichkeiten evaluiert und entwickelt werden (z.B. 3D-Animationen). Insgesamt wird angestrebt, einen umfassenden Satz unterschiedlicher Werkzeuge zu entwickeln, die den verschiedensten Nutzern im alpinen Skisport zur Verfügung gestellt werden.

3 Methodische Grundlagen / Vorgehensweise

3.1 GPS – Global Positioning System

Grundlage beider Projektschwerpunkte bildet die detaillierte Erfassung der Hang-Topologie. Hierzu muss für jede Weltcup-Strecke ein hochauflösendes Digitales Geländemodell erzeugt werden. Da die von amtlichen Stellen zu beziehenden digitalen Geländedaten nicht den notwendigen Genauigkeitsanforderungen entsprechen, muss die jeweilige Strecke selbst vermessen werden. Hierbei bietet sich der Einsatz von GPS an. Das am Institut für Natursport und Ökologie eingesetzte DGPS-System SR 530 der Firma Leica erreicht Genauigkeiten im mm-Bereich.

Weiterhin können mit der GPS-Vermessung auch alle weiteren notwendigen Daten erfasst werden wie z.B. die Lage der Tore, die Pistenränder, einzelne Fahrlinien, Liftstützen, Zeitmesseinrichtungen oder auch Vegetationseinheiten, Schutzgebiete, weitere Infrastruktureinrichtungen etc..

Die GPS-Vermessung erfolgt im kinematischen Modus, d.h. das System zeichnet die Position der sich bewegenden Person (in diesem Falle des Skifahrers) kontinuierlich auf. Hierbei ist eine zeitliche Auflösung von bis zu 10 Hz möglich, d.h. 10 Positionierungen pro Sekunde. Auf diese Weise können in kurzer Zeit quantitativ und qualitativ hochwertige Messergebnisse erzeugt werden.

Neben den Koordinatenwerten (x-, y- und z-Wert) wird mit den Daten auch die exakte Uhrzeit und die Koordinatenqualität (3D-Fehler) gespeichert. Aus der Uhrzeit und der Position kann dann auch für einzelne Fahrlinien die Geschwindigkeit berechnet werden.

Die Genauigkeit der GPS-Daten variiert mit der Qualität des Satellitenempfangs. Anhand der Koordinatenqualität können die nicht verwertbaren Punkte vor der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden.

Zur Hangvermessung wird die Piste in ca. 10 Fahrten mit versetzten Serpentinbahnen befahren um flächig eine hohe Dichte an Messpunkten zu erhalten. Zusätzlich werden die Ränder der Piste und die Tore vermessen. Hierbei befindet sich die GPS-Antenne an einem 2 m langen Stab, der bei der Fahrt im Lot dicht über der Pistenoberfläche gehalten wird. Für Fahrlinienanalysen und Gleitmessungen (vgl. auch Modellkalibrierung Kapitel 5) wird die Antenne auf einen Skihelm montiert.

3.2 GIS – Geographisches Informationssystem

Die Anwendung Geographischer Informationssysteme stellt das zentrale Element im Zuge der Projektbearbeitung dar, da es die Basis für die Datenhaltung und –verarbeitung darstellt.

Neben der Integration der über die GPS-Vermessung gewonnenen Daten können sämtliche anderen raumbezogenen Daten der Skigebiete in die GIS-Datenbank eingebunden werden (z.B. Luft- und Satellitenbilder, Vegetations- und Katasterdaten, Schutzgebiete, Infrastrukturdaten, etc.).

Am Institut für Natursport und Ökologie werden die Geographischen Informationssysteme ArcGIS und ArcView der Firma ESRI eingesetzt.

Für den Projektablauf steht im Hinblick auf die Terrainanalysen zu Beginn der Import und die Plausibilitätskontrolle der erhobenen GPS-Daten.

Die Berechnung des Digitalen Geländemodells aus diesen Höhenpunktdaten erfolgt dann über den TIN-Modus (unregelmäßige Dreiecksvermaschung). Hierzu wird als Begrenzung ein Polygon digitalisiert, das die Messpunkte umschließt und den Pistenrand definiert. Für die weiteren Analyseschritte im Statistikprogramm wird das TIN in ein GRID mit der Rasterweite 0,5 m umgewandelt.

Daran schließt sich die Berechnung verschiedener Hang- und Pistenparameter an (z.B. Hangneigung, Exposition, Länge, Breite / Breitenvariabilität, etc.). Anhand dieser Daten besteht dann unter anderem auch die Möglichkeit Homologierungskriterien abzuleiten bzw. miteinander zu vergleichen und zu überwachen.

Zur weiteren Verwendung der Geländedaten im Simulationsmodell wird ein geeignetes Exportformat entwickelt.

4 Pistenhomologierung

Die bisherige Homologierung der FIS von Weltcuppisten beschränkt sich im Bereich der Geländeparameter nur auf die Festlegung des Höhenunterschiedes (z.B. Damenabfahrt 500-800m), des Torabstandes (mind. 8m) und der Pistenbreite (etwa 30m). Weitergehende, die Strecke betreffenden Kriterien, werden von einem Inspektor evaluiert, der mit der Pistenhomologierung betraut ist und sich auf jahrelange praktische Erfahrungen stützt.

Zielsetzung dieser Forschungen ist es, Geländeparameter abzuleiten, mit deren Hilfe eine differenzierte Homologierung von Weltcuppisten möglich wird. Das Aufzeigen charakteristischer Muster in der Geomorphologie der Pisten und der durch Videoanalysen bestimmten Fahrlinienflächen sollen zusammen mit der Entwicklung von Geländeparametern zusätzlich zum bisherigen Vorgehen ergänzende objektive Entscheidungsgrundlagen für eine Homologierung von Weltcuppisten darstellen.

Die Pisten und auch die Fahrlinien sollen zunächst auf kleinskalige Verteilungsmuster in der Neigung hin überprüft werden. Neigungswechsel, Sprünge und Gleitstücke sowie Messungen der Kurvenradien werden maßgebliche Kriterien sein um eine geeignete Maßzahl wie z.B. einen „Monotoniefaktor“ zu entwickeln und um ein „Attraktivitätsmaß“ zu bestimmen. Daran gekoppelt ist dann auch eine detaillierte Untersuchung der Sicherheitsfragen.

Grundlage dieser Arbeit stellt eine umfassende statistische Analyse der in Kapitel 3 beschriebenen Digitalen Geländemodelle der Weltcuppisten dar. Die Arbeiten hierzu waren zum Zeitpunkt des Drucks dieser Veröffentlichung noch im Gange. Erste Ergebnisse werden im Sommer präsentiert.

5 Simulationsmodell

Die Entwicklung und Anwendung des Simulationsmodells beruht auf der Tatsache, dass der alpine Spitzen-Skirennsport heute technisch wie konditionell auf einem hohen Niveau steht, im Taktikbereich aber große Defizite vorliegen.

Für die Athletinnen und Athleten ist der hohe Leistungsstandard im Technik- und Konditionsbereich mit einem enormen Trainingsaufwand verbunden. Nur so können sie sich in der dicht besetzten Spitze bei Weltcup-Rennen behaupten, wo oft

Sekundenbruchteile oder wenige Zentimeter über Sieg und Niederlage entscheiden. Trotz der großen Leistungsdichte gibt es aber auch Bereiche, in denen Topathleten auffallend unterschiedlich handeln, so etwa, wenn es auf einer Wettkampfstrecke um die schnellste Fahrlinie geht. Bei den schnellen Disziplinen Abfahrt und Super-G liegen die gewählten Strecken manchmal um einige Meter auseinander. Dabei sind diese voneinander abweichenden Fahrlinien in der Regel nicht auf Fahrfehler zurückzuführen, sondern bewusst aus jener etwas undefinierbaren Mischung von Erfahrung, Intuition und Wissen der Trainer und Athleten entstanden.

Dies alles führt immer mehr zu der Auffassung, dass Trainieren rein nach dem Gefühl und nur aus subjektiver Erfahrung heraus nicht mehr möglich ist. Das gilt auch für die Wettkämpfe und deren unmittelbare Vorbereitung, da hier neben den technisch-konditionellen Leistungen auch taktische Aspekte, z.B. die der Linienwahl, eine entscheidende Rolle spielen. Beim Technik- und Konditionstraining werden heute moderne wissenschaftliche Erkenntnisse durchaus verstärkt miteinbezogen, im Taktischen fehlt dies aber um so mehr. Sucht man in der Sportwissenschaft nach Antworten zu diesem Bereich, so ist dort ein großes Defizit festzustellen. Die Trainer und Athleten finden kaum Hilfe zu wichtigen taktischen Fragen: Ist es günstiger, eine Kurve eng zu fahren und nimmt man dabei wegen der größeren Fliehkräfte und den damit höheren technischen und konditionellen Anforderungen eine aufrechte Haltung ein? Oder fährt man besser die technisch einfachere, weite Linie in einer sehr kompakten und aerodynamisch günstigen Körperhaltung?

Ein Ziel der Arbeiten ist es daher, ein Simulationsmodell des alpinen Skirennlaufs zu erstellen, mit dem die Faktoren aufgezeigt, untersucht und miteinander in Bezug gebracht werden können, die die Geschwindigkeit und damit die Leistung beeinflussen.

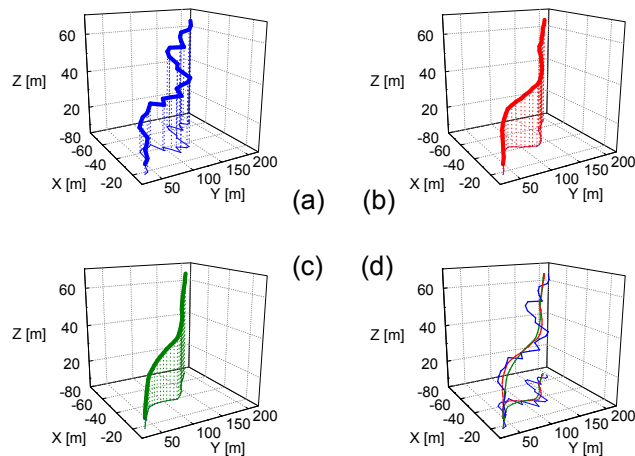
Das Modell selbst basiert auf der Bewegungsgleichung nach Howe (1983) und Wolf (1993). Als Randbedingungen des Modells werden dabei reale Streckenabschnitte und Fahrlinien verwendet. In einem weiteren Schritt werden dann methodische Rechenverfahren (Genetische Algorithmen) entwickelt, mit denen sich auf der Grundlage des Simulationsmodells die Fahrlinie optimieren lässt. Damit steht dann ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem quantifizierbare Aussagen zur Einflussgröße biomechanischer Faktoren im alpinen Skirennsport möglich sind. Ebenso lässt sich damit die Auswirkung verschiedener Fahrlinien auf die Laufzeit berechnen und eine optimale Fahrlinie auf einem gegebenen Streckenabschnitt finden. Genauere Ausführungen zu dem Simulationsmodell finden sich in Seifriz (2001).

Zur Überprüfung des Modells wurde eine Beispielanwendung auf einem Abschnitt einer Super-G-Strecke durchgeführt. Hierbei wurden mehrere Simulationen mit einer Skifahrerin (Läuferin A) mit spezifischen Modellparametern (Masse, Frontfläche, etc.) durchgeführt. Zur Validierung der Modellergebnisse diente die reale Fahrlinie dieser Skifahrerin, die mit Hilfe einer Videoanalyse (3D-Kinematik) erhoben wurde. Für weitere Modellanwendung stehen für die Kalibrierung auch reale Fahrlinienvermessungen mit GPS-Helmantennen zur Verfügung.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 dargestellt. Die Optimierung mit Hilfe des Genetischen Algorithmus lieferte nach 300 Rechenschritten trotz einer um fast 10 m längeren Strecke die kürzere Laufzeit. Dies unterstützt die Tatsache, dass die kürzeste Fahrlinie nicht unbedingt die schnellste Fahrlinie sein muss.

Tab. 1: Vergleich der gemessenen und GA-optimierten Streckenlängen und Laufzeiten (Läuferin A).

Strecke	Streckenlänge (m)	Differenz zum 300. Schritt (m)	Laufzeit (s)	Differenz zum 300. Schritt (s)
GA 300. Schritt	193,59	0	8,14	0
GA 25. Schritt	195,53	1,94	8,58	0,44
GA 1. Schritt	244,07	50,48	10,36	2,22
von Läuferin A	184,81	- 8,78	8,20	0,06


Abb. 1: „Evolutionsschritte“ der GA-Optimierung anhand der Laufzeit: (a) 1. Schritt, (b) 25. Schritt, (c) 300. Schritt, (d) 1., 25. und 300. Schritt (Läuferin A).

Für weitere Fahrerinnen ergaben sich vergleichbare Ergebnisse (GA-Laufzeit entsprach ungefähr der realen Laufzeit). Die Anwendung von Genetischen Algorithmen zur Parameteroptimierung erwies sich als stabiles und robustes Verfahren zum Einsatz im alpinen Skirennsport. Die optimierten Fahrlinien erscheinen für Skirennläufer als realisierbar im Sinne von „fahrbar“.

6 Weitere Anwendungen und Ausblick

Die hier vorgestellten Methoden und Ergebnisse stellen einen ersten Schritt zum Erreichen der Projektziele dar. In einer interdisziplinären Arbeitsgruppe wird in den kommenden Monaten in enger Zusammenarbeit mit dem Deutschen Skiverband an der Weiterentwicklung gearbeitet.

Neben der rein leistungssportbezogenen Modellanwendung können die Modellergebnisse und die erhobenen Daten auch noch anderweitig eingesetzt werden. Eine Möglichkeit ist hierbei die Visualisierung der optimierten Fahrlinien im laufenden Fernsehbild, anhand

derer man direkte Fahrunterschiede darstellen kann und an der Fernsehanstalten großes Interesse haben.

Für die Umsetzung der Modellierungsergebnisse im Trainingsbereich ist auch der Einsatz von E-Learning-Modulen geplant.

Ebenso können durch die Überlagerung von Luft- und Satellitenbildern mit dem Digitalen Geländemodell 3D-Flüge über die entsprechenden Skigebiete erstellt werden, die einen realen und plastischen Eindruck der Weltcupstrecken vermitteln können.

Die erhobenen Geländedaten können zusammen mit den im Modell berechneten Fliehkräften entlang der Fahrlinie auch zur Ausweisung von Sturzsektoren und zur Dimensionierung der Sicherheitseinrichtungen verwendet werden.

Im Rahmen des Projekts sind unter anderem die folgenden weiteren Schritte geplant:

- ▶ detaillierte Aufnahme (GPS-Vermessung) weiterer Weltcup-Skipisten
- ▶ Optimierung der Fahrlinienvermessung mit GPS-Helmantennen
- ▶ Modellierung der Fahrgeschwindigkeit und der auftretenden Fliehkräfte; darauf aufbauend Berechnung von Sturzräumen zur Positionierung und Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen
- ▶ Anwendung der GIS-Analysen in Kombination mit den Modellergebnissen zur Homologierung von Weltcup-Pisten in Zusammenarbeit mit der FIS; Abgleich der bisherigen Homologierungskriterien mit den Ergebnissen der Terrainanalyse
- ▶ Weiterentwicklung und Optimierung des Simulationsmodells, u.a. unter Berücksichtigung weiterer Parameter wie Skitaillierung, Schneekonsistenz u.ä.
- ▶ Operationeller Einsatz des Modells im Trainingsbetrieb: Transfer der berechneten Fahrlinien zum Athleten, Kontrolle der vom Skifahrer gefahrenen Fahrlinien, Integration von GPS-Geschwindigkeitsmessungen (Kopplung von GPS-, GIS- und Modelleinsatz), Aufbau und Einsatz von E-Learning-Modulen
- ▶ Aufbau eines umfassenden Weltcup-Skipisten-Informationssystems (GIS-Datenbank, Abfrageoberflächen, Visualisierungsmöglichkeiten)
- ▶ Weiterentwicklung der Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse (Einblenden der optimierten Fahrlinien in laufende Fernsehbilder, Generierung virtueller 3D-Ansichten und -Animationen, etc.)

7 Literatur

HOWE, J. G. (1983): *Skiing mechanics. – La Porte, Poudre.*

SEIFRIZ, F. (2001): *Simulation im alpinen Skirennsport. Ein Modell zur Analyse der biomechanischen Einflussgrößen und Optimierung der Fahrlinie auf realen Rennpisten mit Genetischen Algorithmen. – Dissertation.de, Berlin.*

WOLF, J. (1993): *Ein deterministisches Modell zur Leistungsdiagnose im alpinen Skirennlauf. – Sport und Buch Strauß, Köln.*