

**Daniel Link & Jürgen Edlmann-Nusser**

## **Ein Simulationsmodell der Rodelabfahrt zur Unterstützung von Trainingsinterventionen im Windkanal**

*A SIMULATION MODEL OF LUGE DOWNHILL RUN FOR SUPPORTING TRAINING INTERVENTIONS IN A WIND TUNNEL*

### *Zusammenfassung*

*Der Strömungswiderstand ist ein wesentlicher Faktor für die Leistung im Rennrodeln. Bereits kurzfristige Veränderungen der Körperaerodynamik – wie beispielsweise das Anheben des Kopfes vor einer Kurveneinfahrt – können zu einer merklichen Verlängerung der Fahrzeit führen. Um den Einfluss von solchen Veränderungen während eines Windkanaltrainings abschätzen zu können, wurde eine Simulationssoftware auf Basis des Modells der schiefen Ebene entwickelt. Als Eingabeparameter dienten das Profil der Rennstrecke in Winterberg, welches mittels differenziellem GPS erhoben wurde, sowie der Strömungswiderstand verschiedener im Windkanal experimentell bestimmter Abfahrtshaltungen. Zwischen berechneten und empirischen Renngeschwindigkeiten lagen Differenzen von ca. 5 %. Exemplarische Modellrechnungen zeigten einen Zeitverlust von 3.1 ms bei einmaligem Anheben des Kopfes vor Kurve 9. Eine dauerhafte Verschlechterung des Strömungswiderstandes, beispielsweise durch nicht ausreichendes Durchstrecken der Kniegelenke, würde sich über die gesamte Renndistanz zu einem Zeitverlust von 214 ms akkumulieren.*

*Schlagworte: Rodeln – Simulation – Hang*

### *Abstract*

*Drag resistance is a crucial factor for performance in luge. Even marginal changes in the aerodynamics – e.g. lifting the head before a turn – may cause an considerable loss of velocity. To estimate the influence of such changes on the racing time, a simulation model based on the equation of motion for an inclined plane was developed. Input parameters were the track course profile data of Winterberg which was obtained by differential GPS measurements as well as the drag resistance of different body postures determined experimentally during various wind tunnel trainings. Comparisons between the simulation model and empirically measured race speeds show differences of 5 % in overall run. Exemplary model calculations showed that a one-time lifting of the head before turn 9 leads to an additional run time of 3.1 ms. A permanent increased drag resistance, caused for example by a decreased ankle plantarflexion, would lead to a loss of 214 ms in overall run time.*

*Key words: luge – simulation – hang*

## **1 Einleitung**

Der Strömungswiderstand des Rodel-Fahrer-Systems ist neben der Dynamik der Anschubbewegungen (Platzer et al., 2009; Schmalz & Türk-Noack, 1993) sowie den

Steuerbewegungen des Athleten und der Fahrlinie (Brüggemann et al., 1997) ein Faktor in der Leistungsstruktur des Rennrodels. Bereits kleine Winkelveränderungen an den Extremitäten führen zu Veränderungen der Widerstandskräfte, die angesichts der Renngeschwindigkeiten von über 140 km/h einen Geschwindigkeitsverlust bewirken. Die Bedeutung einer individuell optimalen Körperposition für Sieg oder Niederlage wird insbesondere dann deutlich, wenn man berücksichtigt, dass zwischen den vorderen Wettkampfrängen häufig weniger als eine Zehntelsekunde pro Lauf liegt (ILF, 2010).

Durch die gezielte Erprobung verschiedener Positionen im Windkanal lassen sich individuell günstige Abfahrthaltungen feststellen und dem Athleten zurückmelden (Meile, 2006). Allerdings muss nicht davon ausgegangen werden, dass die Körperhaltung mit dem geringsten Strömungswiderstand auch gleichzeitig die sinnvollste ist. Beispielsweise erlaubt ein kurzes Anheben des Kopfes vor einer Kurve unter Umständen eine bessere Einfahrt; das Hochziehen der Schultern kann sich positiv auf den Strömungswiderstand auswirken, induziert allerdings eine zusätzliche physiologische Beanspruchung (OSP, 2010).

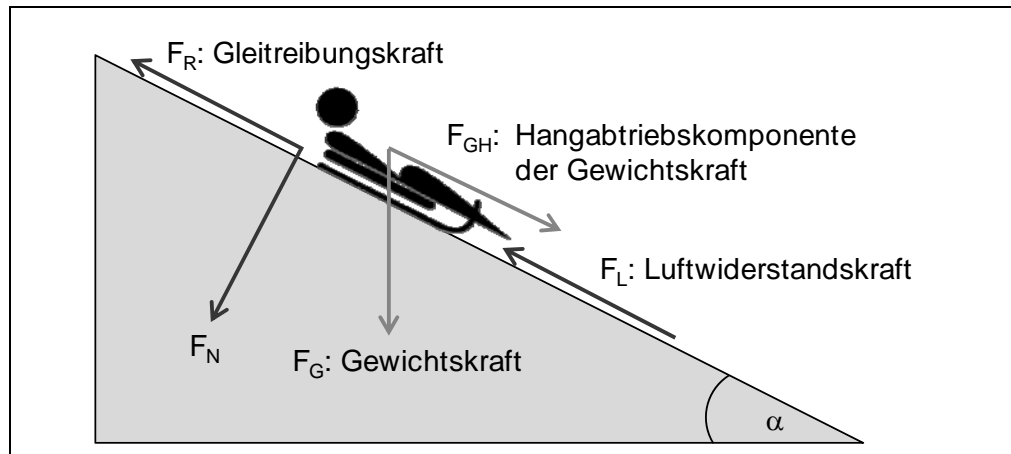
Im Rahmen eines Windkanaltrainings stellt sich somit die Frage, wie die möglicherweise festgestellten Unterschiede in den Strömungseigenschaften von verschiedenen Körperhaltungen in Bezug auf die Fahrzeit einzuschätzen sind. Um Athleten und Trainern hierfür einen Anhaltspunkt zu geben, wurde ein einfaches Simulationsmodell für die Rodelabfahrt implementiert und an die Auswertungssoftware des Windkanals der Technischen Universität Darmstadt gekoppelt. In diesem Beitrag werden im Folgenden das verwendete Verfahren und exemplarische Ergebnisse vorgestellt sowie mögliche Einsatzszenarien diskutiert.

## 2 Methode

Zur Simulation der Abfahrt in Eiskanälen kann auf die klassische Newton'sche Bewegungsgleichung zurückgegriffen werden: Ist die Fahrlinie auf der Bahn bekannt, so lässt sich die resultierende Beschleunigungskraft gemäß der unten stehenden Gleichung in Näherung berechnen (siehe Abb. 1), wenn davon ausgegangen wird, dass die Bahn keine Kurven aufweist. Hierbei wird die auf den Rodel wirksame Kraft ( $F_{Res}$ ) als Summe aus der Hangabtriebs- ( $F_{GH}$ ), Gleitreibungs- ( $F_R$ ) und Luftwiderstandskraft ( $F_L$ ) beschrieben, wobei erstere einen positiven und die beiden letzteren einen negativen Beitrag leisten.

$$\begin{array}{cccc}
 F_{Res} & F_{GH} & F_R & F_L \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\
 m\ddot{x} = m g \sin \alpha - \mu m g \cos \alpha - 0.5 c_w A \rho v^2 \\
 \downarrow \downarrow \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \downarrow \downarrow \\
 \text{Masse} & \text{Hangneigung} & \text{Widerstandsbeiwert} & \text{Anströmfläche} \quad \text{Luftdichte} \\
 \text{Rodelbeschleunigung} & \text{Erdbeschleunigung} & \text{Gleitreibungskoeffizient} & \text{Geschwindigkeit}
 \end{array}$$

Diese 2D-Bewegungsgleichung projiziert die Fahrlinie auf eine schiefe Ebene ohne Kurven, was für den Zweck der Simulation als ausreichend angesehen werden kann. Ähnliche Ansätze finden sich bei Roche et al. (2008) und Larman et al. (2008) für die Simulation der Skeleton-Abfahrt in Sankt Moritz. Das aufwendigere 3D-Verfahren wurde jüngst von Mössner et al. (2011) dargestellt.



**Abb. 1: Vereinfachtes Modell der Rodelabfahrt. Die Hangabtriebskraft ist die in Hangrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft ( $F_G$ ), welche von der Masse ( $m$ ) des Rodel-Fahrer-Systems sowie der Erdbeschleunigung ( $g$ ) abhängig ist. Gebremst wird die Fahrt des Rodels durch die Luftwiderstandskraft ( $F_L$ ) sowie die Gleitreibungskraft ( $F_R$ ). Die Gleitreibung hängt von der Hangneigung, der Masse von Rodel und Fahrer sowie dem materialspezifischen Gleitreibungskoeffizienten  $\mu$  ab. Die Luftwiderstandskraft ( $F_L$ ) ist bestimmt durch die Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ), die Luftdichte ( $\rho$ ) sowie die Strömungseigenschaften des Rodel-Fahrer-Systems, beschrieben durch Widerstandsbeiwert und Anströmfläche.**

Um die 2D-Gleichung auflösen zu können, müssen die Fahrlinie des Rodels, die Strömungseigenschaften des Rodel-Fahrer-Systems sowie der Gleitreibungskoeffizient der Rodelkufen auf Eis bestimmt werden. Für die Berechnung von Geschwindigkeiten, die zurückgelegte Strecke und die Fahrzeit müssen zusätzlich die Parameter der Startphase bekannt sein.

## 2.1 Fahrlinie

Das wesentliche Problem der Modellierung liegt in der möglichst exakten Bestimmung der Fahrlinie – also der 3D-Bewegungstrajektorie des Rodels auf der Oberfläche der Eisbahn. Modelle zur Berechnung der 3D-Bewegungstrajektorie wurden beispielsweise von mehreren Autoren vorgestellt. Mössner et al. (2011) modellierten die Geraden und Kurven der Rennstrecke in Vancouver aus Konstruktionsdaten und die Querschnitte der Bahn in den Kurven durch Ellipsengleichungen. Die Fahrlinie wurde über die Orte bestimmt, an denen die Bodenreaktionskraft senkrecht zur

Eisfläche wirkte. Hubbard et al. (1989) stellten die Bahnoberfläche über einen zwei-dimensionalen Spline dar und berechneten die Fahrlinie durch Lösen der 2D-Bewegungsgleichung auf dieser Fläche.

In dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, die Fahrlinie in hoher Auflösung mittels differenziellem GPS zu schätzen. Dieses war zum einen notwendig, da weder über den Bahnbetreiber noch über das mit der Konstruktion beauftragte Ingenieurbüro verwendbare Bauunterlagen der Bahn bezogen werden konnten. Zum anderen bestand die Erwartung, dass eine hochauflösende empirische Bestimmung der Streckenpunkte zu einer höheren Genauigkeit führt als die mathematische Interpolation auf Basis einiger markanter Streckenpunkte.

Das verwendete System der Firma Leica besteht aus einer Basisstation, einem Datenlogger, der die Daten mit einer Frequenz von 100 Hz aufzeichnet, sowie einem mobilen GPS-Sensor (Abb. 2). Letzterer wurde auf einen Helm montiert und mit diesem die Rennstrecke in Winterberg (Männerstart) auf der geschätzten Fahrlinie der Athleten von unten nach oben aufrecht abgescritten. Während in den Geraden und flachen Kurven die Fahrlinie recht zuverlässig abgegangen werden konnte, stellt dies in steilen Kurven ein Problem dar. Hier wurde versucht, mit dem Sensor möglichst nahe an die wahrscheinliche Fahrlinie heranzukommen. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese aufgrund der Kurvenneigung und fehlender Haltemöglichkeiten um bis zu 1 Meter unterschritten wurde.



**Abb. 2:** Erhebung der geografischen Koordinaten der Rennstrecke in Winterberg mittels differenziellem GPS. Links: Basisstation zur Fehlerkorrektur von atmosphärisch bedingten Laufzeitverzerrungen der Satellitensignale. Mitte: Mobile Empfangseinheit und Datenlogger. Rechts: Abgehen der Rennstrecke auf der geschätzten Fahrlinie. Der Höhenoffset von 2 m wurde in Nachbearbeitung von der z-Koordinate abgezogen.

Unter idealen Messbedingungen wird der Fehlerbereich des GPS-Systems vom Hersteller mit weniger als 2 cm angegeben. Es ist anzumerken, dass diese Genauigkeit nur über Teilbereiche der Strecke realisiert werden konnte. An einigen Stellen war aufgrund der Betonbauten in den Kurven sowie der Überdachung der Strecke mit Blechplatten die direkte Sichtlinie zu den Satelliten teilweise unterbrochen und die Genauigkeit der Positionsbestimmung eingeschränkt. In diesem Bereich wurden Koordinaten gemessen, die bis zu mehreren Metern neben der Rennstrecke lagen. Im Rahmen der Datenbereinigung wurden daher nur Koordinaten mit einer Genauigkeit von mindestens 10 cm gemäß eines systeminternen Qualitätsindex verwendet. War innerhalb von 30 cm kein Datenpunkt in dieser Genauigkeit verfügbar, wurde die Strecke bis zum nächsten validen Datenpunkt manuell interpoliert.

Mittels der auf diese Weise erhobenen Rohdaten wurde ein Streckenprofil mit ca. 5.000 Segmenten gleicher Steigung und einer Länge von ca. 30 cm erzeugt. Die Hangneigung  $\alpha$  innerhalb dieser Segmente wurde aus der Höhendifferenz der beiden Segmentendpunkte und ihres euklidischen Abstandes in der Horizontalebene bestimmt.

## 2.2 Strömungswiderstand und Gleitreibung

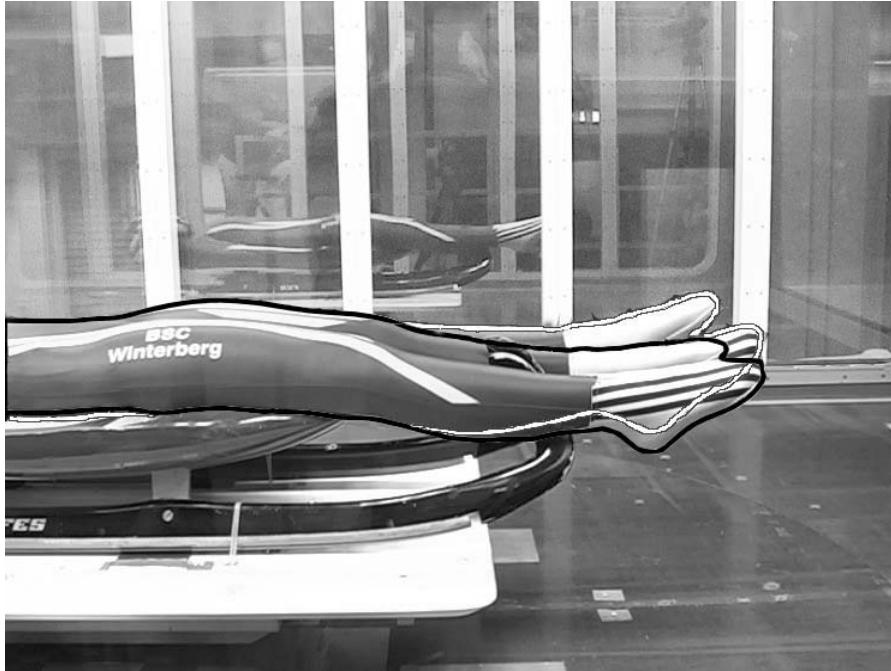
Die *Strömungseigenschaften*  $c_w A$  von Rodel und Fahrer wurden im Windkanal im Rahmen eines Messplatztrainings mit acht Nachwuchssportlerinnen des Olympiastützpunktes Winterberg experimentell bestimmt. Hierbei wurden die Athleten instruiert, für einige Sekunden in der für sie als optimal eingeschätzten Abfahrtschaltung zu verbleiben, um dann die Position gezielt zu verändern und erneut zu halten (z. B. leichtes Anheben des Kopfes, starkes Anheben des Kopfes, Hochziehen der Schultern zum Kopf, Beugen der Knie usw.). In den Zeiträumen, in denen die Körperpositionen annähernd konstant gehalten werden konnten, wurde der durch den Ventilator erzeugte Staudruck  $q$  und die am Rodel in Strömungsrichtung wirkende Kraft  $F_y$  über entsprechende Sensorik gemessen (Details zum Messverfahren bei Link & Edlmann-Nusser, in Begutachtung). Gemäß des Zusammenhangs

$$c_w A = \frac{F_y}{q}$$

erhält man somit einen Messwert für das Produkt aus Widerstandsbeiwert und Anströmfläche. Abbildung 3 zeigt eine Überblendung von zwei Abfahrtschaltungen einer Athletin, wobei die Haltung mit den weniger durchgestreckten Fußgelenken (weiße Umrandung) einem um 0.014 schlechteren  $c_w$ -Wert entspricht (der Wert für die Anströmfläche wurde für einen Rodeler einmalig visuell bestimmt und für alle weiteren Berechnungen als konstant betrachtet).

Der *Gleitreibungskoeffizient*  $\mu$  zur Berechnung der Gleitreibung der Rodelkufen auf Eis lässt sich ebenfalls empirisch im Labor bestimmen. Diesbezügliche Arbeiten wurden im Rennrodeln von Fauve und Rhyner (2008) und im Bobsport von Itagaki, Lemieux und Huber (1987) vorgestellt. Allerdings ist davon auszugehen, dass der

Gleitreibungskoeffizient auf verschiedenen Streckenabschnitten nicht nur potenziell unterschiedlich ist (Eistemperatur und -beschaffenheit, Schneefall), sondern sich auch im Laufe eines Rennens verändert (z. B. durch Veränderung der Sonneneinstrahlung). Auch wenn es die entwickelte Simulationssoftware (siehe unten) konzeptionell erlaubt, unterschiedliche Gleitreibungskoeffizienten zu spezifizieren, so wurde darauf verzichtet und unter Bezugnahme auf den von Itagaki et al. (ebd.) angegebenen Bereich ein konstanter Wert von 0.008 verwendet.



**Abb. 3: Überlagerung zweier Körperhaltungen während des Windkanaltrainings. Die Variante mit gestreckteren Beinen führt zu einem um 0.014 Punkte besseren  $c_w$ -Wert.**

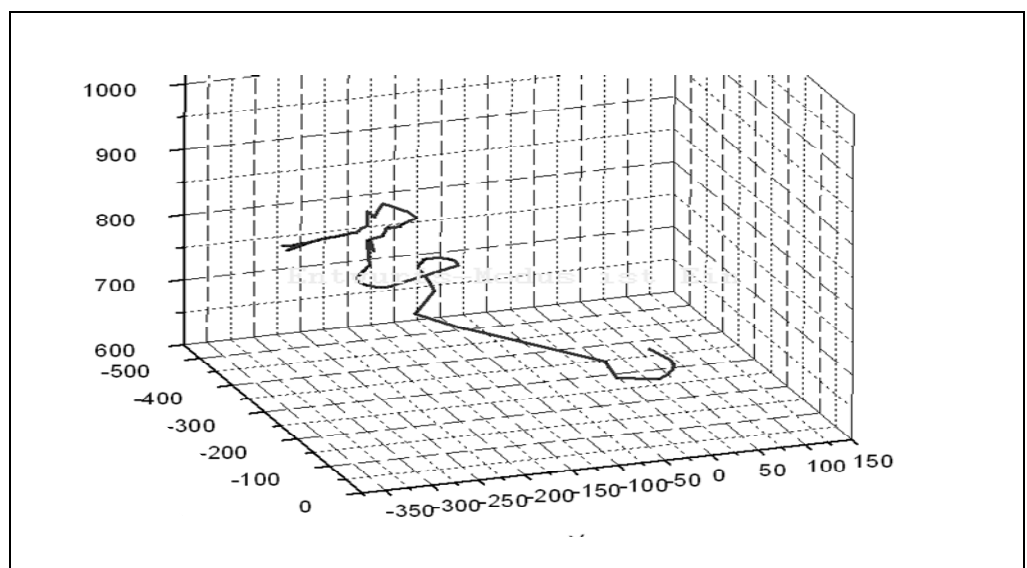
### 2.3. Startparameter und Software

Da in der Startphase aktive Anschubbewegungen des Athleten sowohl durch Abdrücken von den Startholmen als auch in Form von mehreren sogenannten Pinguinschlägen erfolgen (Platzer et al., 2009), ist die Simulation erst ab einem Streckenpunkt nach dieser Startphase möglich. Zur Berechnung von Geschwindigkeiten, Fahrstrecke und Fahrzeiten müssen zu diesem Streckenpunkt die *Startparameter* in Form von aktueller Geschwindigkeit ( $v_0$ ), Fahrzeit ( $t_0$ ) und bis dahin zurückgelegter Strecke ( $s_0$ ) spezifiziert werden. Für die Simulation wurde der Streckenpunkt der ersten Zeitnahme gewählt. Dieser wird in Winterberg von der Weltspitze je nach Witterungsbedingungen nach ca. 4.5 s erreicht; die gemessenen Geschwindigkeiten liegen hier bei ca. 55 km/h.

Die genannten Modellparameter können ebenso wie das Gewicht von Rodel und Athlet, Luftdichte, Gleitreibungskoeffizient und der Basis  $c_w A$ -Wert über eine Oberfläche in eine eigens entwickelte Simulationssoftware eingegeben werden. Darüber hinaus lassen sich Streckenbereiche spezifizieren, an denen der Athlet von der idealen Abfahrthaltung abweicht sowie das Ausmaß und die Dauer der  $c_w A$ -Veränderungen in diesen Abschnitten.

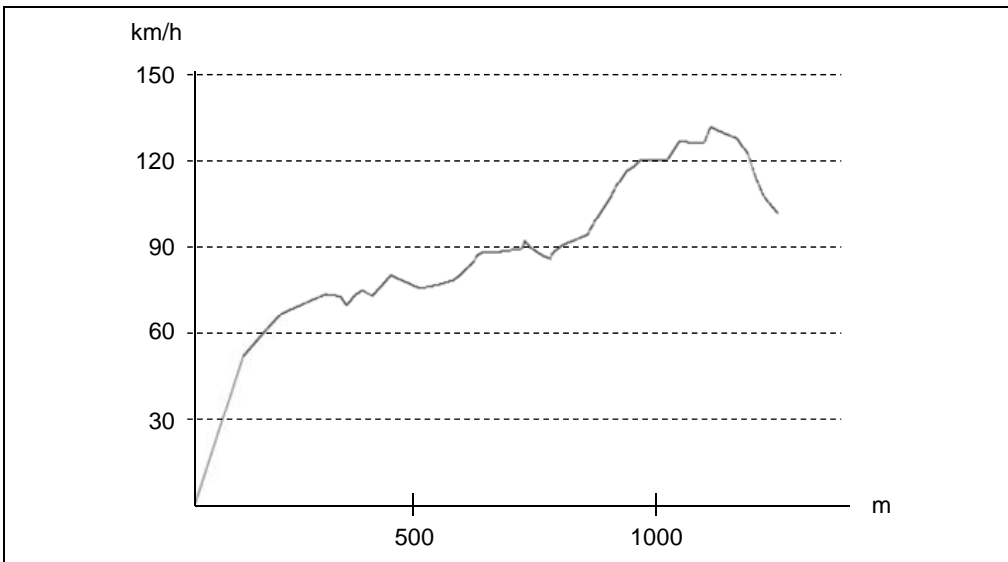
### 3 Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt das dreidimensionale Profil der Rennstrecke in Winterberg auf Basis der GPS-Rohdaten. Für diese Strecke wurde im Rahmen eines Windkanaltrainings mit Nachwuchsathleten des Olympiastützpunktes in Winterberg eine Reihe von Simulationsberechnungen durchgeführt. Exemplarisch stellt Abbildung 5 den Geschwindigkeitsverlauf für einen Athleten (Gewicht  $m=117$  kg; Luftdichte  $\rho=1.187$  kg/m<sup>3</sup> bei 0° C und 700 m Höhe) über die Renndistanz dar. Die Berechnung der Bewegungsgleichung erfolgte über numerische Integration bei einer Intervallgröße von 1 ms.



**Abb. 4: 3D-Modell der Rennstrecke in Winterberg auf Basis von ungefilterten GPS-Daten. Die Strecke hat demnach eine Länge von 1311 m, bei einer maximalen Höhendifferenz von 101 m und einem durchschnittlichen Gefälle von 9.6 %. Das maximale Gefälle liegt bei 14.3 % zwischen den Kurven 13 und 14.**

Die auf Basis dieser Daten berechnete Höchstgeschwindigkeit beträgt 132.81 km/h und liegt erwartungsgemäß vor Kurve 14. Die simulierte Geschwindigkeit entspricht in etwa den dort tatsächlich gemessenen Höchstgeschwindigkeiten. Die Gesamtfahrzeit liegt simuliert bei 51.21 s und liegt ca. 2.5 s unter den real erzielten Zeiten der Weltspitze.



**Abb. 5: Geschwindigkeitsverlauf einer Rodelabfahrt über die Renndistanz. Bis zum Simulationsstartpunkt bei der ersten Zwischenzeit wird von einem linearen Geschwindigkeitsanstieg ausgegangen. Die höchste Geschwindigkeit liegt mit 130.92 km/h unmittelbar vor der Kurve 14.**

Gemäß der Simulationsrechnung (Tab. 1) würde die in Abbildung 3 mit weißer Umrandung dargestellte Abfahrtshaltung im Vergleich zur besseren (schwarze Umrandung) zu einer Zeitdifferenz von 0.214 s führen, wenn sie konstant über den gesamten Rennverlauf bestünde.

**Tab. 1: Simulationsergebnisse**

	$\Delta$ Fahrzeit in s
Änderung des $c_w$ -Wertes über die komplette Streckenlänge	
$\Delta c_w = + 0.014$	+ 0.214
$\Delta c_w = + 0.020$	+ 0.328
Änderung des $c_w$ -Wertes bei Anheben des Kopfes ( $\Delta c_w = + 0.01$ ) für 1s	
vor Kurve 1 (60 km/h)	+ 0.0032
vor Kurve 5 (90 km/h)	+ 0.0031
vor Kurve 14 (128 km/h)	+ 0.0015



Ein Aufrichten des Kopfes um ca.  $15^\circ$  ( $\Delta c_w = +0.01$ ) für 1.0 s führt je nach Streckenposition zu Zeitverlusten zwischen 3.2 ms und 1.5 ms auf der Gesamtstrecke. Hierbei kommen zwei gegenläufige Effekte zum Tragen: Zum einen wirken sich Geschwindigkeitsverluste in frühen Phasen des Rennens stärker aus, da sie sich über die größere Reststrecke akkumulieren. Auf der anderen Seite sind die fahrhaltungsbedingten Geschwindigkeitsverluste gegen Ende des Rennens aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeiten größer. Summativ führt das Anheben des Kopfes vor den Kurven 1 und 5 zu einem Zeitverlust in der gleichen Größenordnung (3.2 ms bzw. 3.1 ms) und vor der Zielkurve 14 zu einem geringeren Zeitverlust (1.5 ms).

## 4 Diskussion

### 4.1 Simulationsgenauigkeit

Das vorgestellte Verfahren erlaubt es, den Einfluss von Positionsveränderungen mit relativ wenig Aufwand abschätzen zu können. Den simulierten Fahrzeiten ist selbstverständlich mit der gebotenen Zurückhaltung zu begegnen. Bezüglich der Bestimmung des  $c_w A$ -Wertes ist festzustellen, dass sich die der Simulation zugrunde liegende Vorstellung von klar bestimmbar und über einen Zeitraum konstanten Abfahrtshaltungen so in der Realität nicht wiederfinden lässt. Durch die ständigen Erschütterungen, Fliehkräfte und Lenkbewegungen ist der Athlet ständig in Bewegung, während er gleichzeitig versucht, eine möglichst strömungswiderstandsarme Position auf dem Schlitten zu finden. Diese Bewegung führt zu kontinuierlich wechselnden aerodynamischen Zuständen, die so im Windkanal nicht hinreichend simuliert werden können.

Darüber hinaus besteht bei jeder Windkanalsimulation die sogenannte Grenzflächenproblematik: Während sich der Rodel in der realen Abfahrt relativ zur Bahnoberfläche und der über ihr stehenden Luft fortbewegt, strömt die Luft im Windkanal über den auf einer Fläche stehenden Rodel. Es besteht hier an der Grenzfläche zwischen Rodel und Bahn eine jeweils unterschiedliche Strömungssituation, die potenziell zu unterschiedlichen  $c_w A$ -Werten führt. Weitere potenzielle Fehlerquellen im Windkanal sind die nicht vorhandenen Banden sowie die fehlende Möglichkeit Kurvenfahrten zu simulieren.

Auf der Seite der Abfahrtmodellierung muss berücksichtigt werden, dass lediglich eine 2D-Bewegungsgleichung verwendet wurde. Ebenfalls wurde von Scher- und Zentrifugalkräften abgesehen, von denen letztere eine merkliche Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten in den Kurven verursacht. Diese führt über höhere Gleitreibungskräfte zu einem Geschwindigkeitsverlust und kann zur Erklärung der, im Vergleich zu Weltcuprennen, geringeren simulierten Fahrzeit und höheren Geschwindigkeit von ca. 5 % herangezogen werden. Eine weitere Erklärung für diesen Effekt wäre die durch die Restriktionen bei der DGPS-Messung eher zu kurze Fahrlinie.

In Summe liegt der Simulation – wie bei jeder anderen Form der Modellierung auch – eine ganze Reihe von Vereinfachungen und potenziellen Ungenauigkeiten zugrunde. Es ist davon auszugehen, dass sich deren Auswirkungen auf die Fahrzeit in

Größenordnungen befinden, die über jenen der Effekte liegen, die durch die Positionsveränderungen verursacht wurden. Beispielsweise führt eine Variation der Startgeschwindigkeit um +1.0 km/h zu einer Verkürzung der Gesamtfahrzeit von 0.3 s. Ein Fehler in der Abschätzung der Startgeschwindigkeit in dieser Größenordnung hätte größere Auswirkung auf die Fahrzeit als die in Abbildung 3 gezeigte Verschlechterung der Abfahrthaltung.

## **4.2 Einsatzbereich**

Der prinzipiell kritischen Betrachtung der Modellgenauigkeit muss ihr praktischer Einsatzzweck gegenübergestellt werden. Variiert man als Simulationsparameter einzig den  $c_wA$ -Wert, so lässt sich davon ausgehen, dass der Fehler bezüglich der resultierenden Fahrzeitveränderungen in einer für Interventionen während eines Windkanaltrainings ausreichenden Größenordnung liegt.

Bislang wurde das vorgestellte Verfahren während des Windkanaltrainings in Ergänzung von Echtzeit-Feedbacktechnologien eingesetzt. Um dem Athleten ein Gefühl für aerodynamisch sinnvolle und weniger sinnvolle Körperhaltungen zu geben, wurde der aktuelle Strömungswiderstand in ein Tonsignal unterschiedlicher Frequenz umgesetzt (je höher, desto höher der Strömungswiderstand) und dem Athleten in Echtzeit über einen Lautsprecher im Helm zugespielt (zum Verfahren siehe Link & Edelmann-Nusser, unter Begutachtung). Diese Sonifikation erfolgte unter der Erwartung, dass die direkte Kopplung von Bewegungen an ein akustisches Signal ein besseres motorisches Lernen ermöglicht (Effenberg, 2005). Die Athleten konnten sich quasi in die günstigste Position „hineinhören“.

Durch Kopplung des Simulationsmodells an die Sonifikationssoftware ist es möglich, Interpretationshilfen wie „wenn du diesen Ton eine Sekunde hörst, kostet dich das ungefähr 3 ms“ zu geben. Athleten und Trainer erhalten so einen Anhaltspunkt, ob und wenn ja, an welcher Stelle der Rennstrecke eine Verschlechterung der Abfahrthaltung unter taktischen Überlegungen in Kauf genommen werden kann. Beispielsweise ist nach der dargestellten Simulationsrechnung davon auszugehen, dass ein ein- oder zweimaliges kurzes Anheben des Kopfes vor besonders kritischen Kurven in Winterberg nicht wesentlich die Fahrzeit verlängert. Würde dies jedoch vor jeder Kurve erfolgen, akkumulierten sich die Zeitverluste über vier Läufe auf ca. 0.21 s. Ein solcher Zeitverlust würde die Wahrscheinlichkeit von Rangverlusten in der Endplatzierung doch merklich erhöhen. Viele Athleten der Weltspitze prägen sich daher nach eigenen Angaben den Streckenverlauf möglichst exakt im Vorfeld ein und versuchen vollständig auf ein Aufrichten des Kopfes vor einer Kurve zu verzichten. Eine taktische Abwägung diesbezüglich erscheint daher insbesondere bei weniger erfahrenen Athleten im Nachwuchsbereich von Interesse.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der hier gewählte Simulationsansatz – insbesondere unter einer Kosten-Nutzen-Abwägung – als „gut genug“ angesehen werden kann. Der Nutzen des Simulationsmodells für die Praxis ergibt sich insbesondere in Zusammenschau mit dem akustischen Feedbackverfahren. Der Einsatzzweck liegt allerdings eher in der Abschätzung der Größenordnungen von Fahrzeitverlusten bei Positionsveränderungen als in der exakten Voraussage von Fahrzeiten.

## Literatur

- Brüggemann, G.-P., Morlock, M., & Zatsiorsky, V. M. (1997). Analysis of the bob and luge events (men) at the XVII Olympic Winter Games in Lillehammer. *Journal of Applied Biomechanics*, 13 (1), 98-109.
- Effenberg, A. O. (2005). Movement Sonification: Effects on Perception and Action. *IEEE Multimedia, Special Issue on Interactive Sonification*, 12 (2), 53-59.
- Fauve, M., & Rhyner, H. U. (2008). Analysis and optimization of the sliding properties of luge steel blade runners on ice. *The Engineering of Sport 7*, 1, 579-586.
- Hubbard, M., Kallay, M., & Rowhani, P. (1989). Three-dimensional bobsled turning dynamics. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, 222-237.
- International Luge Federation. (2010). Luge Men's Singles Competition, Olympic Winter Games 2010. *Final Results Report*. Vancouver, Canada.
- Itagaki K., Lemieux G. E., & Huber N. P. (1987). Preliminary study of friction between ice and sled runners. *Le Journal de Physique Colloques*, 48, 297-301.
- Larman, R., Turnock, S. R., & Hart, J. (2008). Mechanics of the bob skeleton and analysis of the variation in performance at the St. Moritz World Championship of 2007. In M. Estivalet, & P. Brisson (Eds.), *The Engineering of Sport 7* (pp. 117-126). Heidelberg: Springer.
- Link, D., & Edlmann-Nusser, J. (in Begutachtung). Drag Coefficient Sonification in Luge Using a Wind Tunnel. *International Journal of Sports Science and Engineering*.
- Meile, W. (2006). *Windkanaluntersuchungen für den Österreichischen Rodelverband. Hal-tungsuntersuchungen und Materialtests*. Unveröff. Bericht, Institute for Fluid Mechanics and Heat Transfer, Graz University of Technology.
- Mössner, M., Hasler, M., Schindelwig, K., Kaps, P., & Nachbauer, W. (2011). An approximate simulation model for initial luge track design. *Journal of Biomechanics*, 44 (4), 892-896.
- OSP. (2010). Persönliche Mitteilung von Trainern und Athleten des Olympiastützpunktes in Winterberg.
- Platzer, H.-P., Raschner, C., & Patterson, C. (2009). Performance-determining physiological factors in the luge start. *Journal of Sports Sciences*, 27 (3), 221-226.
- Roche, J., Turnock, S. R., & Wright, A. M. (2008). An analysis of the interaction between slider physique and descent time for the bob skeleton. In M. Estivalet, & P. Brisson (Eds.), *The Engineering of Sport 7* (pp. 101-110). Heidelberg: Springer.
- Schmalz, T. & Türk-Noack, U. (1993). Geschwindigkeitsmessung mit Laserdiodentechnik. *Leistungssport*, 23 (6), 29-31.