

Beschleunigungsanalysen im Bobsport – mehr Fragen als Antworten

Matthias Scherge, Team Snowstorm, 76316 Malsch

Kurzfassung

In dieser Analyse werden Geschwindigkeits-, Geometrie- und Beschleunigungsdaten von Bobfahrten auf 7 unterschiedlichen Bahnen ausgewertet. Es ergeben sich Punktwolken aus jeweils 1.200 Messfahrten. Einige der Punktwolken weisen auf deutliche Trends hin, während andere die Zusammenhänge im Hintergrund nur unzureichend ausleuchten. Die Analysen erlauben allerdings das Aufstellen von zielführenden Hypothesen, die über detaillierte Auswertungen der Daten in der Zukunft bestätigt oder widerlegt werden können.

Was wurde untersucht?

Beschleunigungsmessungen Mit Hilfe eines Dreiachs-Inertialsensors von Swiss-Timing wurden in der Saison 2015/16 auf 7 Bobbahnen, d.h. Altenberg, Igls, Königssee, Lake Placid, Park City, Winterberg und Whistler die wirkenden Beschleunigungen längs,

quer und vertikal zum Bob ermittelt. Zusätzlich wurden Weg und Zeit, die Verdrehung in Fahrtrichtung (Rollwinkel) sowie die Geschwindigkeit des Bobs mittels Radar gemessen. In die Analysen flossen sowohl Ergebnisse von Zweier- und Viererbob sowie von Damen- und Herrenteams ein.

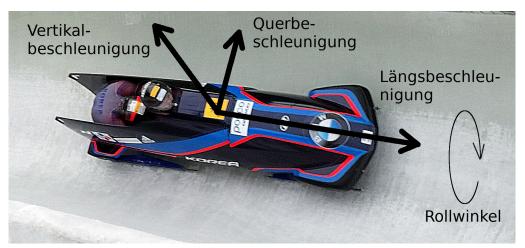


Abb. 1: Neigung und Beschleunigungen in Fahrtrichtung, quer sowie senkrecht dazu. Alle Geschwindigkeiten werden in km/h, die Beschleunigungen in m/s² und die Winkel in Grad angegeben.

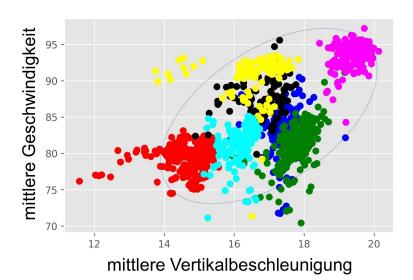
Datenauswertung

Für die Analysen standen insgesamt 1.200 Datensätze zu Verfügung. Jeder Datensatz hatte 6.000 Zeilen mit den oben genannten Größen, die mit 100 Hz aufgezeichnet wurden. Somit ergab sich eine Gesamtzahl von auswertbaren Datenpunkten von mehr als 50 Mio., was eine händische Analyse unmöglich machte. Daher wurden mittels Python 3.8 Algorithmen programmiert, um eine maschinelle Auswertung zu ermöglichen. In der einfachsten Form derartiger Auswertungen entstehen Diagramme, die Korrelationen erkennen lassen. Eine tiefere Art der Analyse kann mit den Werkzeugen des maschinellen Lernens erfolgen, wird aber in diesem Beitrag nicht gezeigt.

Ergebnisse

Gravitation und Fliehkraft

Senkrecht zu Quer- und Längsbeschleunigung wirkt die Vertikalbeschleunigung, die sich aus den Einflüssen von Gravitation und Zentrifugalanteil zusammensetzt. Vertikalbeschleunigung ist untrennbar mit dem Rollwinkel verbunden. Der Rollwinkel ist gleich Null, wenn der Bob steht oder geradeaus fährt. In Kurven wächst der Rollwinkel, der Werte größer 90° erreichen kann. Für den Fall, dass der Rollwinkel 90° überschreitet, verbleibt nur die Wirkung der Zentrifugalbeschleunigung. Die Gravitation wirkt natürlich weiter, hat aber keinen Beitrag in Normalrichtung, d.h. senkrecht zur Eisoberfläche.



Altenberg Igls Königssee Lake Placid Park City Winterberg Whistler

Abb. 2: Messdatenerfassung auf den Bahnen in Altenberg, Igls, Königssee, Lake Placid, Park City, Winterberg und Whistler.

die Kufe ins Eis drückt, Normalkraft. v gemessen werden kann – wie in Es gilt: Normalkraft = Bobmasse \times (Gravitation + Zentrifugalbeschleunigung) [1]. Für den Fall, dass der Rollwinkel ungleich Null ist, kommen die Komponenten der Beschleunigungen zum Einsatz. Weiterhin gilt, dass die wirkende Reibleistungsdichte P Wärme erzeugt, die das Eis unter der Kufe oberflächennah aufschmilzt und einen Gleitfilm erzeugt. Je größer die Normalkraft ist, desto reibungsmindernder ist der Wasserfilm. Es gilt:

$$P = \frac{\mu F_n \nu}{A_r} \tag{1}$$

Der Reibungskoeffizient μ ist hier- 100 km/h. bei keine Konstante, sondern ändert den Geschwindigkeiten ist die Bahn

Tribologisch heißt die Kraft, die sich im Reibkontakt [2]. Während diesem Beitrag durch Radar – muss die Kontaktfläche Ar berechnet werden.

> Geschwindigkeit und Vertikalbeschleunigung

Wenn man die mittlere Geschwindigkeit (Mittelung über alle Geschwindigkeitswerte eines Laufs) in Abhängigkeit der Vertikalbeschleunigung aufträgt, wird deutlich, dass es schnelle und langsamere Bahnen gibt. Abbildung 2 zeigt die auf den oben genannten Bahnen erreichten Geschwindigkeiten mittleren in einem Band von 70 bis knapp Der Spitzenreiter bei

in Whistler. Geschwindigkeiten, die ca. 20 km/h für die Piloten dar. über den Werten der langsamsten Bahn, d.h. Igls, liegen. Mit Bezug auf die Verteilung der Geschwindigkeiten fällt auf, dass mit höheren Beschleunigungen die Geschwindigkeiten steigen. Bei der Clusterung der Geschwindigkeiten gibt es Bahnen - wie z.B. Whistler - die eine geringe Streuung aufweisen, während die Bahn in Park City über einen weiten Bereich streut. Ähnlich verhält es sich für die Bahnen am Königssee im Vergleich mit Igls. Bei der Verteilung der Geschwindigkeiten fällt wieder breite von ca. 7 km/h auf. Geschwindigkeiten in einem Bere- nen, siehe Abb. 3. ich von fast 20 km/h. Dieses Di-

Diese Bahn erlaubt agramm stellt eine Art Stresstest Für Whistler kommt es ab Kurve 2 zu Beschleunigungswerten größer 4g und ab Kurve 11 zu Geschwindigkeiten über 130 km/h für alle weiteren Kurven. Die Punkte liegen dicht beieinander, die Bobs fahren also lange im Bereich der mittleren Geschwindigkeit. Igls ist insgesamt langsamer, die Kurvenradien sind häufig groß, die Messpunkte verteilen sich breiter. Der Mittelwert aller Punkte sollte somit ein Indikator für die Schwierigkeit der Bahn sein [3].

Aus den Bahnverläufen, mittleren Whistler mit geringer Variations- Gefällen und Kurvenzahlen ist aller-In dings kein Zusammenhang mit der Altenberg hingegen variieren die mittleren Geschwindigkeit zu erken-

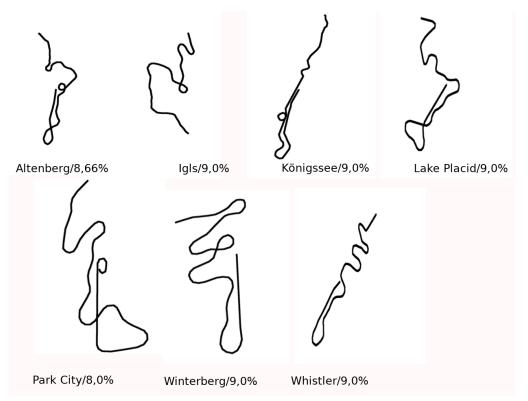
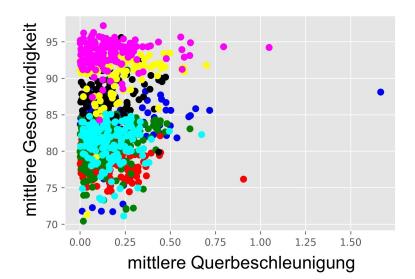


Abb. 3: Betrachtete Bahnen und mittleres Gefälle.

Geschwindigkeit und Querbeschleunigung

Die Querbeschleunigungen sind das Ergebnis des Lenkeingriffs. Wenn zu finden ist. es keine Querbeschleunigung, aber Geschwindigkeiten führen.

dafür gefährliche Stürze. Auch sind die Bahnen so konstruiert, dass nur mit Lenkeingriff, die optimale Linie Mitunter existieren der Bob frei laufen würde, gäbe mehrere Fahrlinien, die zu hohen



Altenberg lals Königssee Lake Placid Park City Winterberg Whistler

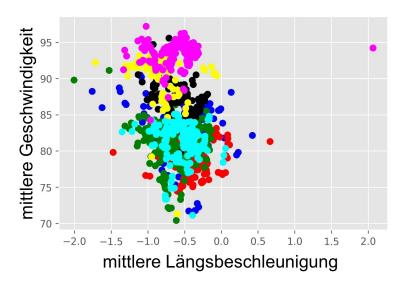
Abb. 4: Geschwindiakeit als Funktion der Beschleunigungen quer zur Fahrtrichtung des Bobs.

Somit sollte die Größe Querbeschleunigungen mit der Geschwindigkeit in Zusammenhang stehen. Abbildung 4 stellt diese Abhängigkeit dar. Da es durch die Lage Geschwindigkeit und Längsbeschleuder Kurven (nach rechts oder links) per Definition positive oder nega- Werden die mittleren Geschwindigkeitive Querbeschleunigungen gibt, wur- ten in Relation zur Längsbeschleuniden alle Werte als Betrag dargestellt. gung gebracht, wird deutlich, dass Für alle Bahnen ist eine leichte Ten- nahezu alle Beschleunigungen negdenz nach rechts oben, das heißt ative Werte aufweisen. zu höheren Geschwindigkeiten zu verzeichnen. Für die Bahn in Altenberg gibt es bei einer Fahrt einen Extremwert. Zu diesem könnte der wie bei der Querbeschleunigung Eingang zu Kurve 13 geführt haben, spreizen die Werte mit zunehmender wo es eine nur 3.5 m lange Ein- Geschwindigkeit leicht auf. Zwischen gangsklothoide gibt. Der Übergang 70 und 75 km/h beträgt die Spreizung von einem Kurvenradius von 25 m etwa 0,5 m/s² und bei 90 km/h sind es auf 3.5 m erzeugt einen Querruck ca. 2 m/s². Die Längsbeschleunigung Trotz der vielen Datenpunkte bleibt die Abhängigkeit aber unscharf, Folge von Vertikal- und Querbeschleuwas andeutet, dass weitere Effekte –

der möglicherweise Fahrfehler – Einfluss haben müssen.

nigung

Das bedeutet, dass vom Start abgesehen, der Bob während der ganzen Fahrt gebremst wird. ist nach dem Startvorgang die direkte nigung.



Altenberg lals Königssee Lake Placid Park City Winterberg Whistler

Abb. 5: Geschwindigkeit als Funktion der Beschleunigungen längs zur Fahrtrichtung des Bobs.

Diskussion

Auf Basis der Betrachtung der Punktwolken lassen sich eine ganze Reihe von Hypothesen aufstellen.

- Die Streuung der Vertikalbeschleunigungen hängt vom Schnitt der Bahn sowie vom Vorhandensein mehrerer gleichberechtigter Fahrlinien ab.
- Die Streuung der Geschwindigkeiten ist durch Fahrfehler begründet.
- Je größer die Vertikalbeschleuni- **Danksagung** gungen sind, desto geringer ist der Einfluss des Materials.
- Die Streuung der Geschwindigkeiten kann durch die Eistemperatur sein.

Es wird deutlich, dass Antworten auf die gestellten Fragen allein aus den präsentierten Diagrammen nicht abgeleitet werden können. Vermutlich liegen die Antworten in der detaillierten Auswertung der einzelnen Bahnen unter Berücksichtigung der vorliegenden Kurvensituationen. Möglicherweise ist es notwendig, die Analyse von Videos einzubeziehen.

Ein herzlicher Dank geht an Markus Streicher (Swiss-Timing) und André Lange für die fruchtbare Diskussion. [4] sowie den Präparationszu- Für Begutachtung, fachliche Hilfe und stand der Kufen [5,6] beeinflusst konstruktive Kritik danke ich Mike Richter.

Über den Autor



Matthias Scherge ist Professor für Tribologie. Das ist die Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Prof. Scherge leitet das Fraunhofer MikroTribologie Centrum, lehrt am Karlsruher Institut für Technologie und managed das Team Snowstorm. Darüber hinaus berät er das Nordic Paraski Team Deutschland sowie mehrere nationale und internationale Athleten in wissenschaftlichtechnischen Fragen.

Quellen

- [1] Melanie Dumm, Christian Hainzlmaier, Stephan Boerboom, and Erich Wintermantel. The Effect of Pressure on Friction of Steel and Ice and Implementation to Bobsleigh Runners. THE ENGINEERING OF SPORT, 6:103-106, 2006.
- [2] Matthias Scherge, Roman Böttcher, Mike Richter, and Udo Gurgel. High-Speed Ice Friction Experiments under Lab Conditions: On the Influence of Speed and Normal Force. ISRN Tribology, 2013:1–7, 2013.
- [3] Mike Richter. persönliche Kommunikation. März 2021.
- [4] Louis Poirier, Edward P. Lozowski, and Robert I. Thompson. Ice hardness in winter sports. Cold Regions Science and Technology, 67(3):129 - 134, 2011.
- [5] Christian Hainzlmaier. A new tribologically optimized bobsleigh runner. PhD thesis, Technische Universität München, 2005.
- [6] Mathieu Fauve and Hansueli Rhyner. Analysis and Optimization of the Sliding Properties of Luge Steel Blades on Ice. THE ENGINEERING OF SPORT, 7:579-586, 2008.