



Der Kreisel in Winterberg – Geschwindigkeit und Beschleunigung

Matthias Scherge, Team Snowstorm, 76316 Malsch

Kurzfassung

Beim Bobfahren wirken Beschleunigungen in allen 3 Raumachsen. Darüber hinaus kommt es zu Drehungen und Neigungen. Die Beschleunigungen senkrecht zur Fahrtrichtung können dabei Werte von bis $4g$ annehmen, was sich direkt auf die Reibung zwischen Eis und Kufe auswirkt. Eine indirekter Einfluss auf die Reibung entsteht durch die Wirkung der Beschleunigungen in und quer zur Fahrtrichtung. Die Beschleunigung in Fahrtrichtung ist hierbei eine Folge der wirkenden Querbewegung, die maßgeblich von den Lenkbewegungen abhängt.

Was wurde untersucht?

Wenn ein Bob die Bahn herunterfährt, entstehen, ausgelöst durch die Hangabtriebskraft, Beschleunigungen in und gegen die Fahrtrichtung sowie quer und senkrecht dazu. Die Beschleunigung senkrecht zur Fahrtrichtung vereint die Wirkung der Gravitation und der Fliehkraft. Derartige Beschleunigungen können das Vierfache der Erdbeschleunigung, d.h. Werte größer als 40 m/s^2 , erreichen [1]. Die Querbewegung resultiert maßgeblich aus den Lenkbewegungen. In Fahrtrichtung entsteht Beschleunigung beim Anschieben sowie durch Verzögerungen, die durch das Lenken verursacht werden. Bei den Drehbewegungen spricht man in Fahrtrichtung von Nicken, quer zum Bob von Rollen und senkrecht zum Bob von Gieren. Während das Nicken durch die Bahneigung bestimmt ist, rollt der Bob in der Kurvenfahrt und giert, wenn er in Fahrtrichtung ausbricht oder durch

die Lenkbewegung quer gestellt wird.

Es ist klar ersichtlich, dass sich die Beschleunigungen in und gegen die Fahrtrichtung auf die Geschwindigkeit auswirken. Nicht so klar ersichtlich ist das für die Anteile in Vertikal- und Querrichtung. Vertikal zur Fahrtrichtung steigt mit zunehmender Beschleunigung die Kraft, die die Kufe auf und in das Eis drückt (Normalkraft F_n). Sehr verbreitet ist immer noch die Annahme, dass durch Druckschmelzen der schmierende Wasserfilm entsteht. Diese Annahme hat sich aber als falsch herausgestellt. Realistischer ist die Theorie, dass die Wasserfilmbildung durch Scherschmelzen, welches durch die wirkende Reibleistungsdichte P verursacht wird, getrieben ist:

$$P = \frac{\mu F_n v}{A_r} = \frac{F_r v}{A_r} \quad (1)$$

Diese Gleichung enthält den Bruch F_n/A_r , der die Dimension eines

Drucks besitzt, aber durch das Reibungsgesetz $\mu = F_r/F_n$ in die Gleichung gelangt. μ ist der Reibungskoeffizient, A_r die reale Kontaktfläche zwischen Kufe und Eis, F_r die Reibungskraft und v die Geschwindigkeit. Die Kufe produziert während der Fahrt also ihren eigenen Wasserfilm, der den nanometerdünnen Film, der sich auf der Eisoberfläche sowieso befindet, verstärkt. Die reale Kontaktfläche ist eine Funktion des Elastizitätsmoduls sowie der Poissonzahl von Kufe und Eis und des Radius der Kufe. Weiterhin hängt sie von der Normalkraft ab. Und hier wirken wieder Gravitation und Fliehkraft zusammen.

Quer zum Bob wirken Beschleunigungen, die durch den Eingriff des

Piloten entstehen. Die Beschleunigungen treten auf, wenn der Bob auf der Geraden ausbricht oder in Kurven, je nachdem, welche Fahrlinie der Bobpilot wählt. Je nach dem, wie eng die bevorzugt Kurvenlinie ist, desto stärker ist die Beschleunigung nach außen gerichtet.

Wie wurde untersucht?

Beschleunigungsmessungen

Die Messungen erfolgten mit einem Dreiachsbeschleunigungssensor von SwisTiming. Zusätzlich zu den Beschleunigungen wurden Rollwinkel und Geschwindigkeit mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst. Mittels Radar wurde die Geschwindigkeitsmessung realisiert.

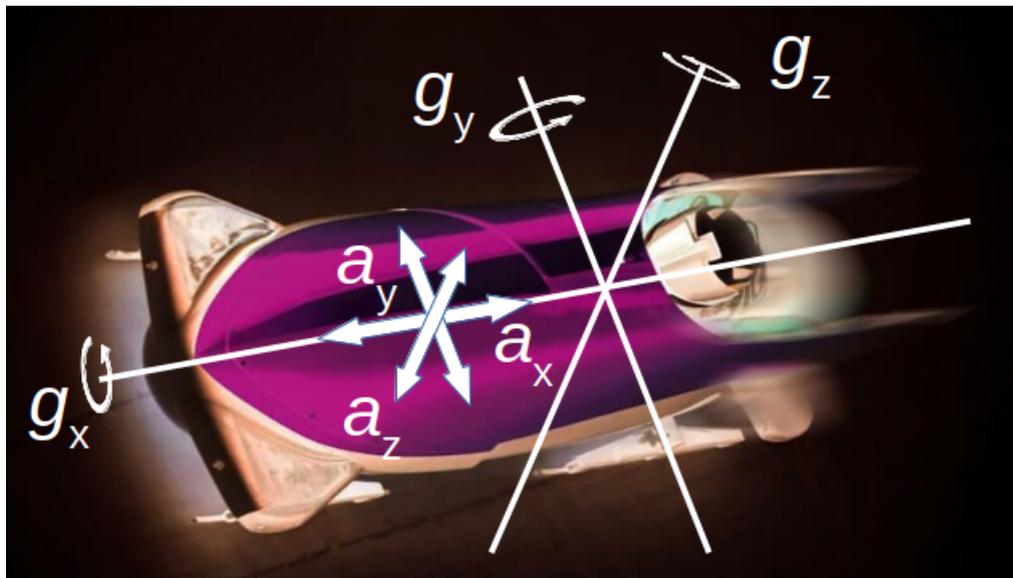


Abb. 1: Beschleunigungen und Neigungen in Fahrtrichtung (x-Richtung), quer (y-Richtung) sowie senkrecht dazu (z-Richtung).

Datenauswertung

Für die Auswertung standen 143 Datensätze von Bobfahrten auf der Bahn in Winterberg mit oben genannten Parametern zu Verfügung. Die programmtechnische Umsetzung erfolgte mit Python.

Ergebnisse

Gesamtbild

Die Gesamtdarstellung in Abb. 2 zeigt die Geschwindigkeit, die Querbeschleunigung und den Rollwinkel als Funktion der Fahrzeit. Nach einem anfänglichen fast linearen

Anstieg der Geschwindigkeit folgen einige Verringerungen als Reaktion auf große Kurven, z.B. Omega, Kreisel und Zielkurve. Die maximale Geschwindigkeit liegt bei knapp über 130 km/h. Die Rollwinkel zeigen maximale Werte von größer 80 Grad. Auffallend sind die Doppelmaxima in den großen Kurven. Die Querbeschleunigungen sind mit dem Faktor 10 multipliziert, so dass die Maxima dieser Fahrt bei ca. 40 m/s^2 liegen. Man erkennt in dieser Darstellung keinen Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit.

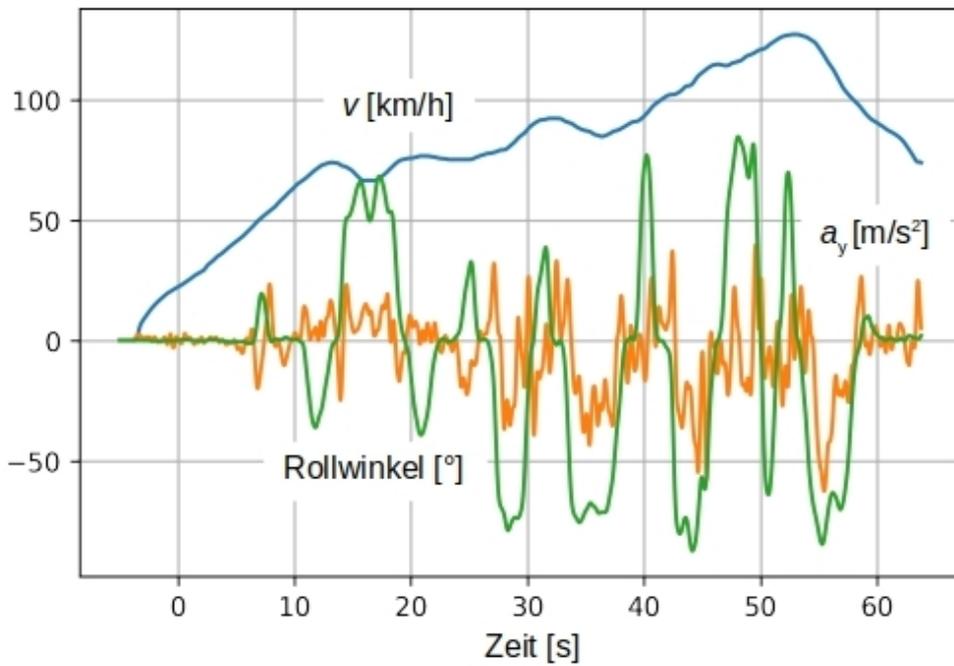


Abb. 2: Messdatenerfassung auf der Bahn in Winterberg.

Beschleunigungen

Die Beschleunigung in und entgegen der Fahrtrichtung sind eine Folge der auftretenden Querbeschleunigungen. Beide Größen sind somit gekoppelt

und eine Darstellung beider Beschleunigungen in einem Diagramm resultiert in einer verschlungenen Kurven, wie sie in Bild 3 dargestellt sind.

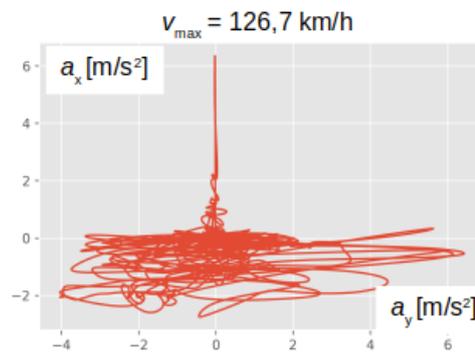
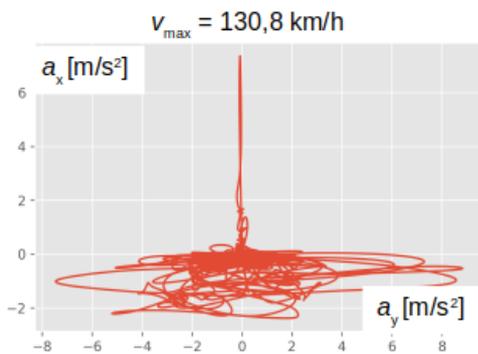


Abb. 3: Beschleunigungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Zusätzlich zu den Beschleunigungen gibt die Abbildung die in diesen Läufen erreichte Maximalgeschwindigkeit an, die sich um fast 4 km/h unterscheidet. Die Beschleunigungen in Fahrtrichtung spielen sich fast ausschließlich im negativen Bereich ab. Die positiven Werte widerspiegeln den Anschub. Je größer der Anteil der Beschleunigungen im negativen Bereich und je mehr Anteile bei größeren negativen Werten auftreten, desto langsamer ist der Bob, was man im rechten Bild gut erkennt. Im linken Bild liegt der Hauptteil der Beschleunigungen zwischen 0 und -1 m/s^2 , rechts dagegen sind die Werte im Bereich zwischen 0 und -2 m/s^2 etwa gleich verteilt.

Die Querbeschleunigungen variieren bei der schnelleren Fahrt zwischen -8 m/s^2 und 9 m/s^2 und bei der langsameren Fahrt -4 m/s^2 und 6 m/s^2 . Mittels Gradientenanalyse da_x/da_y wurde der Grad der Verschlaufung analysiert. Es konnte belegt werden, dass während der langsameren Fahrt viel mehr Wechsel auftraten, das Beschleunigungsknäuel also deutlich verfitzter ist.

Analyse kritischer Stellen

Als kritischer Bereich wurde der Kreislauf ausgewählt und für alle 143 Läufe die Auswirkung der mittleren Querbeschleunigungen im Kreislauf auf die Ausfahrgeschwindigkeit

analysiert. Erst die Analyse dieser Abhängigkeit erkennen, siehe Abb. 4. großen Anzahl von Läufen lässt eine

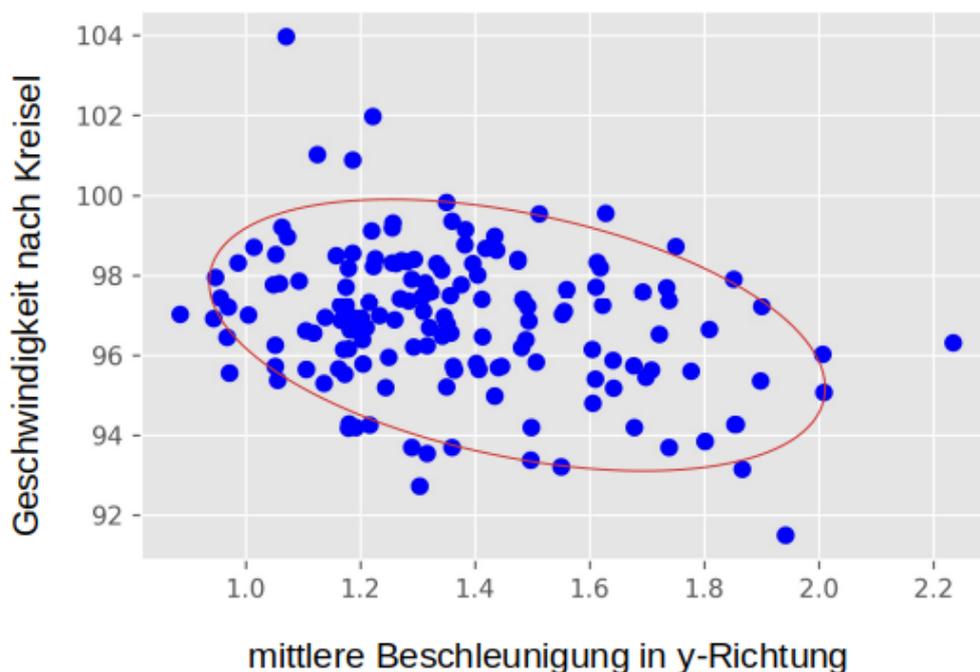


Abb. 4: Geschwindigkeit als Funktion der Querbeschleunigungen.

Die erhaltene Punktwolke hat die Form einer Zigarre und zeigt kleinere Geschwindigkeiten für größere mittlere Querbeschleunigungen.

Diskussion

Die Analysen erlauben eine ganze Reihe von Schlussfolgerungen, die den Spezialisten bekannt sein dürften, jetzt aber mit Daten untermauert werden können.

Zu viel bremsen macht langsam

In der Tat hat sich gezeigt, dass der Großteil der x-Beschleunigungen im negativen Bereich auftritt, also für das Bremsen spricht. Da allerdings vor der Ziellinie nicht aktiv gebremst wird, muss die Verzögerung andere Ursachen haben. In erster Linie wirken Lenkvorgänge, die mit dem Einschlagen der Kufen verbunden sind, bremsend. Der Reibungskoeffizient in Längsrichtung der Kufe beträgt bei schneller Fahrt etwa 0,005 bis 0,009 [2]. Quer dazu kommt es zu einer Verzehnfachung. Nachgeordnet sind Wechsel in der Eishärte, die durch Unterschiede in der Kühlleistung entlang der Bahn verursacht werden können. Aber auch Änderungen in der z-Beschleunigung können sich bremsend auswirken. Je höher der Bob z.B. durch die Kurve fährt, desto

geringer ist der Anteil der Erdbeschleunigung an der Normalkraft. Nach Gleichung 1 verringert sich damit die Reibleistung und weniger Wasser wird gebildet. Es hat sich gezeigt, dass die Bahnen, die die größte z-Beschleunigungen zulassen, auch die höchsten Geschwindigkeiten erlauben [3].

Die Harmonie macht's

Je harmonischer, d.h. ruckfreier der Bob vom Start zum Ziel fährt, desto schneller ist er unterwegs. Häufige Wechsel in der Querbeschleunigung bremsen. Dabei ist die maximale Größe der Beschleunigung nicht wichtig. Entscheidend ist die mittlere Querbeschleunigung.

Was steckt noch in den Daten?

Die hier präsentierten Analysen decken nur einen sehr kleinen Teil der möglichen Untersuchungsmöglichkeiten ab. Neben der Analyse der Beschleunigungen an kritischen Stellen der Bahnen, kann mittels zusätzlichem Sensor das Lenkverhalten des Piloten einbezogen werden. Ebenso erhellend dürfte die Kopplung der erhaltenen Werte mit Videodaten sein, um exakt die Reaktion des Bobs mit den Gegebenheiten der Bahn in Verbindung zu bringen.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an Dr. Markus Streicher und André Lange für fachliche Hilfe und konstruktive Kritik.

Über den Autor



Matthias Scherge ist Professor für Tribologie. Das ist die Wissenschaft von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Prof. Scherge leitet das Fraunhofer MikroTribologie Zentrum, 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 wissenschaftlich-technischen Fragen.

Quellen

- [1] Christian Hainzmaier. *A new tribologically optimized bobsleigh runner*. PhD thesis, Technische Universität München, 2005.
- [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] Matthias Scherge. Beschleunigungsanalysen im Bobsport – mehr Fragen als Antworten. *Gliding*, 1:8–12, 2021.