
Univ.-Prof. Dr. Thomas Christian Gasser

Univ.-Prof. für Biomechanik und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für die Simulation von Sportunfällen am Institut für Festkörpermechanik, Königlich Technische Hochschule Stockholm

Dr. Peter Eichelter

Sen.-Präs. des OLG Graz i.R. und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für Schifahren und Snowboarden

Numerische Simulation von Bewegungsabläufen auf Schipisten

Schwerpunkt Pistenkollision

1. Einleitung

Pistenunfälle sind im Allgemeinen durch ein Minimum an Fakten für eine Entscheidungsfindung gekennzeichnet. Die klassischen Rekonstruktionsverfahren gestatten dem schichttechnischen Sachverständigen in den meisten Fällen die Erzielung eines Ergebnisses, das dem Gericht eine nachvollziehbare Beweismöglichkeit und eine dem Beweismaß genügende Feststellung der unfallursächlichen Bewegungsabläufe ermöglicht. In Zweifelsfällen kann jedoch der Einsatz numerischer Simulationswerkzeuge hilfreich sein. Dieser Artikel soll die Möglichkeiten der numerischen Simulation für die Tätigkeit des Schisachverständigen aufzeigen. Am Beispiel der Pistenkollision werden die Vorgangsweise bei der Simulationserstellung, deren Ergebnisse sowie die Relevanz der jeweiligen Modellannahmen diskutiert.

2. Motivation

Der Bewegungsablauf eines Schifahrers (Snowboarders) ist durch seine Fahrspur als Funktion der Zeit grundsätzlich gegeben. Daraus können Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden. Der **Bewegungsablauf muss den Bewegungsgleichungen gehorchen**, so darf zB der Kurvenradius, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit gefahren werden kann, nicht zu klein sein, damit der Schifahrer (Snowboarder) die resultierenden Kräfte beherrschen bzw auf die Pisten übertragen kann. Eine **Simulation berechnet einen Bewegungsablauf, der in Einklang mit den physikalischen (mechanischen) Gesetzmäßigkeiten ist**, und stellt daher die **physikalische (mechanische) Plausibilität** eines rekonstruierten Bewegungsablaufes sicher. Physikalische Gesetzmäßigkeiten werden in Form von **Modellen** (mathematischen Zusammenhängen, wie zB das *Newton'sche* Gesetz, das besagt, dass Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist) angenähert. In diesem Sinne kann die Simulation wertvolle Information eines Bewegungsablaufes liefern, wie sie für die rechtliche Aufarbeitung von zB Pistenkollisionen hilfreich sind.

3. Methodik

3.1. Information für die Unfallsimulation

Eine Pistenkollision ist ein komplexer (mechanischer) Vorgang, dessen Eigenschaft durch eine Anzahl von **Parametern** (Hilfsgrößen) gekennzeichnet ist. Parameter unterschiedlichster Natur können dabei erfasst werden. Diese sind im jeweiligen Einzelfall jedoch immer **mehr oder weniger ungenau**, weshalb sie innerhalb des Konfidenzintervalls (Vertrauensintervalls) zu variieren sind. **Eingangsparmeter** können dabei **direkt** und **Ausgangsparameter indirekt** (dh durch Änderung der Eingangsparameter) verändert werden.

- Folgende Informationen kommen als Parameter in Betracht:
- vor der Kollision (Annäherungsrichtung, Annäherungsgeschwindigkeit);
- während der Kollision (Verletzungen, Schäden an der Ausrüstung);
- nach der Kollision (Endlagen, Verletzungen etc);
- Eigenschaften der Kollisionsteilnehmer (Masse, Größe, Fahrverhalten);
- Eigenschaften der Piste (Gefälle, Beschaffenheit).

3.2. Simulationsablauf

Um eine Simulation durchzuführen, müssen **Modellannahmen** getroffen werden und das **reale Objekt** (bzw der reale Prozess) **modellhaft beschrieben** werden. Im Fall einer Pistenkollision müssen Modelle der **Kollisionsteilnehmer**, der **Piste** und der **Interaktionen** (zwischen Kollisionsteilnehmern untereinander und mit der Piste) getroffen werden. Die Aussagekraft einer Simulation wird sehr stark von der Brauchbarkeit dieser Modelle abhängen. Brauchbarkeit muss immer im Kontext der beabsichtigten Aussage der Simulation gesehen werden.

Ist die **Modellbildungsphase** abgeschlossen und wird die **Genauigkeit der erwarteten Vorhersagen** als zufriedenstellend empfunden, müssen **Simulationsanfangsbedingungen** festgelegt werden. Im Fall einer Pistenkollision werden dazu die Modelle der Kollisionsteilnehmern auf der modellierten Piste **positioniert** und mit **Fahrtrichtung, Geschwindigkeit** und ggf mit **Beschleunigung** (bei Kurvenfahrten) versehen. Nun beginnt die eigentliche Simulation, wobei der aus den Anfangsbedingungen **resultierende Bewegungsablauf berechnet wird**. In sehr einfachen Fällen kann dies analytisch geschehen, dh, die mathematischen Zusammenhänge liegen in einer Form vor, die es erlaubt Bewegungsgrößen (Geschwindigkeit, Beschleunigung ...) für jeden Zeitpunkt direkt zu bestimmen. In den meisten Fällen kann die Bewegung jedoch nur numerisch mittels eines **Zeitschrittverfahrens** bestimmt werden. Dabei wird ausgehend von einem bekannten Bewegungszustand der Bewegungszustand im nachfolgenden Zeitpunkt (einen Bruchteil von Millisekunden später) vorherberechnet.

Nach erfolgter Berechnung kann mit der **Auswertung der Daten** begonnen werden. Daten der Simulation sind ua **Bewegungsbahnen**, zeitliche Verläufe von **Geschwindigkeit** und **Beschleunigungen** und daraus abgeleitete Größen wie **Kräfte**.

4. Modellbildung

4.1. Allgemeines

Die Modellbildung betrachtet ein **reales Objekt** (bzw einen **realen Prozess**) und versucht, dieses modellhaft zu beschreiben. Ein **Modell** stellt immer eine **Vereinfachung der Realität** dar, was im Hinblick auf die Anwendung des Modells abgestimmt ist. Nur wenn man weiß, was mit einem Modell simuliert werden soll, kann man entscheiden, was vom realen Objekt (bzw Prozess) vernachlässigt werden kann!

4.2. Überprüfung von Modellvorhersagen

Die modellhafte Beschreibung des realen Objekts (bzw Prozesses) führt zu einer Anzahl an **mathematischen Gleichungen**, die gelöst werden müssen, um Vorhersagen treffen können. Die mathematischen Gleichungen folgen zB aus dem Einhalten der *Newton'schen* Mechanik, oder der Energiebilanz während des Bewegungsablaufs.

Das fehlerfreie Lösen solcher mathematischen Gleichungen wird in einem **Verifikationsschritt** sichergestellt, wohingegen die Brauchbarkeit der getätigten Modellannahmen in einem **Validierungsschritt** sichergestellt wird.

4.3. Einkörperprobleme

Je nach Einsatz des Modells werden verschiedene Modellannahmen getroffen, die letztendlich auf eine **Weg-Zeit-Relation** führen. Aus der Weg-Zeit-Relation kann dann der

Geschwindigkeitsverlauf bzw der Beschleunigungsverlauf berechnet werden.

Die einfachsten Modelle beschreiben dabei einen einzelnen Körper, der sich unter der Einwirkung von Kräften bewegt. Heben sich die Kräfte, die auf den Körper wirken auf, zB die Reibungskräfte eines Schifahrers halten der Beschleunigungskraft (im Gravitationsfeld) das Gleichgewicht, wird er sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegen (**gleichförmige Bewegung**). Bei der Anfahrt überwiegen die Beschleunigungskräfte und der Schifahrer wird daher beschleunigt, dh, seine Geschwindigkeit vergrößert sich mit der Zeit (**beschleunigte Bewegung**). In diesen Fall setzt er **potenzielle Energie** (Lageenergie) in **kinetische Energie** (Bewegungsenergie) um. Bei einer **konservativen Bewegung** tritt dabei keine Dissipation (Umsetzung in nicht rückgewinnbarer Energie wie zB Wärmeenergie) auf, sodass der Schifahrer seine Bewegungsenergie wieder in potenzielle Energie umsetzen kann, zB durch Hinauffahren auf den Gegenhang.

Jede reale Bewegung ist von Dissipation begleitet und kann daher als **reibungsbefahete Bewegung** angesehen werden. Um eine reibungsbefahete Bewegung zu beschreiben, müssen Annahmen bezüglich der auftretenden Reibung gemacht werden. Im Schilauftypische Reibungen sind Luftwiderstand und Reibung zwischen Schi und Piste. In Sturzsituationen tritt auch Reibung zwischen den Körperteilen des Schifahrers und der Piste auf.

4.4. Zweikörperprobleme

Naturgemäß müssen bei Kollisionen zumindest zwei Körper betrachtet werden. Dabei wird der Bewegungsablauf vor und nach der Kollision als zwei unabhängige Einkörperprobleme betrachtet, wobei die Kollision selbst mit Hilfe der **Impulsgleichungen** behandelt wird. Die Impulsgleichungen basieren auf der **Impulserhaltung**, die sich aus den *Newton'schen* Bewegungsgleichungen ableitet, und zusätzlichen Annahmen bezüglich des Energieaustauschs beim Kontakt (Stoß) folgen. Beim Stoß zweier Körper werden diese im Kontaktbereich verformt, und je nach der Eigenschaft dieser Verformung können die Grenzfälle des (ideal) **Elastischen** und (ideal) **Plastischen Stoßes** unterschieden werden.

Beim elastischen Stoß ist die Verformung im Kontaktbereich **vollkommen elastisch** (reversibel) und es treten daher beim Energieaustausch von dem einen Körper auf den anderen Körper keine Verluste (Dissipation) auf.

Beispiel elastischer Stoß: Trifft ein Körper k_1 , der Masse m mit der Geschwindigkeit v auf einen stehenden Körper k_2 derselben Masse m , wird seine Bewegungsenergie vollkommen (verlustfrei) auf den stehenden Körper k_2 übertragen. Dh, nach dem Stoß ist k_1 in Ruhe und k_2 bewegt sich mit der Geschwindigkeit v .

Beim plastischen Stoß ist die Verformung im Kontaktbereich **vollkommen plastisch** (irreversibel) und es treten

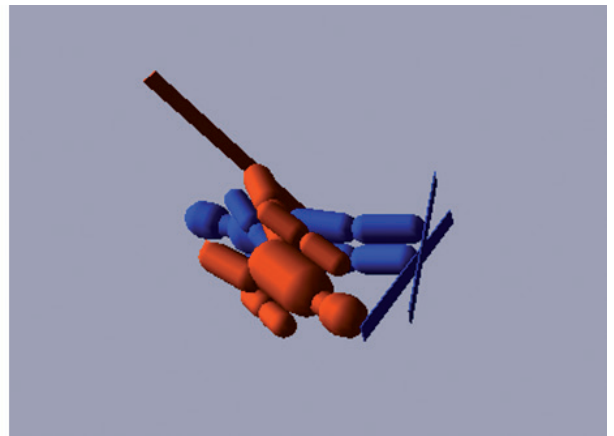


Abbildung 1: Endlagen einer simulierten Pistenkollision, wobei ein Schifahrer, von der Seite kommend, mit 50 km/h mit einem stehenden Schifahrer kollidiert; *links:* Laborversuch mit Crash-Test-Dummys (Bildquelle: SuvaLiv, Schweiz); *rechts:* MKS-Simulation

daher beim Energieaustausch von dem einen Körper auf den anderen Körper Verluste (Dissipation) auf. Wie groß diese Verluste sind, hängt von dem Massenverhältnissen der beiden Körper ab. Trifft ein (relativ) sehr leichter Körper auf einen (relativ) sehr schweren, stehenden Körper auf, wird die komplette Bewegungsenergie dissipiert, dh im bleibende Deformation und Wärme umgesetzt. Dies ist zB der Fall, wenn man einen plastischen Körper an die Wand wirft.

Beispiel plastischer Stoß: Trifft ein Körper k_1 der Masse m mit der Geschwindigkeit v auf einen stehenden Körper k_2 derselben Masse m , wird nur die Hälfte seiner Bewegungsenergie auf den stehenden Körper k_2 übertragen, und nach dem Stoß bewegen sich beide Körper gemeinsam mit der Geschwindigkeit $v/2$.

Elastischer und plastischer Stoß sind energetische Grenzfälle und ein realer Stoß ist eine Mischung aus diesen beiden, was mit der **Stoßzahl** gekennzeichnet wird. Der elastische Stoß hat eine Stoßzahl von 1 und der plastische Stoß von 0.

Unter allgemeinen dreidimensionalen Verhältnissen verändert der Stoß nicht nur die (translatorische) **Geschwindigkeit**, sondern auch den **Drall** eines Körpers. Der Stoß zweier Körper kann daher mit einer **Vielzahl von Impulsen** einhergehen und zu sehr komplexen Bewegungsmustern führen.

4.5. Mehrkörpersysteme (MKS)

Der Stoß zweier Körper (Zweikörperproblem) beschreibt die Unfallsituation im Kfz-Wesen ausreichend, wobei Stoßzahlen aus den Deformationen der Fahrzeuge rückgeschlossen werden können bzw in Datenbanken zur Verfügung stehen. **Die mechanische Komplexität der Pistenkollision kann mit dem Stoß zweier Körper meist nicht beschrieben werden**, und die Kollisionspartner müssen mit sog Mehrkörpersystemen (MKS)¹ modelliert werden. Ein MKS besteht aus **mehreren gelenkig miteinander verbundenen Teilkörpern**, dh, die Bewegung

der Teilkörper ist durch die Kinematik der Gelenke eingeschränkt. Gelenke werden zusätzlich mit Steifigkeiten und Viskositäten versehen, die den Bewegungsablauf beeinflussen. Um MKS für Pistenkollisionen einsetzen zu können, müssen zusätzliche **Interaktionen** zwischen den verschiedenen Teilkörpern (innerhalb eines MKS und zwischen den beiden MKS der Kollisionspartner) berücksichtigt werden. Dabei müssen **Stöße** (basierend auf den zuvor diskutierten Stoßgleichungen) und **Reibung** (basierend auf Reibungsgesetzen) zwischen den Teilkörpern modelliert werden.

5. Genauigkeit

Ungenauigkeit einer MKS-Simulation kann grundsätzlich zwei Ursachen haben, wie sie mit **Verifikation** bzw **Validierung** untersucht werden. Die **Verifikation** stellt sicher, dass kein **Berechnungsfehler** die Genauigkeit der Simulationsergebnisse beeinträchtigt und dass die mathematischen Gleichungen, die das Modell repräsentieren richtig gelöst wurden.

Die **Validierung** stellt sicher, dass die getroffenen **Modellannahmen nahe genug an dem realen Objekt** (bzw dem realen Prozess) und daher akzeptabel sind. Ein Modell kann nur für den **vorgesehenen Einsatzbereich** validiert werden.

Die Verifikation eines Simulationsmodells für Pistenkollisionen ist mehr oder weniger einfach, wogegen dessen Validierung schwierig ist. Man begnügt sich, wie auch in der Fahrzeugindustrie, mit der Simulation des **passiven Verhaltens des menschlichen Körpers**. Dh, während des Simulationsablaufs ändert das MKS-Modell seine aktiven Muskelkräfte nicht, eine konstante Körperspannung kann jedoch berücksichtigt werden. Ergebnisse aus **Laborexperimenten** mit Crash-Test-Dummys² unter verschiedenen Kollisionssituationen können daher zur Validierung eines MKS-Modells verwendet werden. Soll aus den Endlagen der Kollisionsteilnehmer auf den Unfallhergang geschlossen werden, muss das MKS-Modell den Be-

wegungsablauf zwischen der Kollision und den Endlagen simulieren können.

Ein Vergleich der Endlagen aus einem Laborexperiment mit denen mittels MKS-Simulation berechneten ist in Abbildung 1 dargestellt. Obwohl die Simulation in diesem speziellen Fall ein Lösen der Schier nicht ident vorher-sagte, zeigen das Laborexperiment (links) und die entsprechende MKS-Simulation (rechts) doch eine sehr gute Übereinstimmung der Endlagen.

Wie erwähnt, berücksichtigen sowohl das Laborexperiment als auch die Simulation nur den **passiven Zusammenprall**. Diese Annahme wird für viele Kollisionen gerechtfertigt sein, bei denen die Endlagen schnell erreicht sind und daher kaum Zeit für aktives Eingreifen (Agieren) der Kollisionspartner gegeben ist. Speziell bei langen Rutschphasen nach der Kollision, dh, wenn Zeit zum Agieren besteht, kann der reale Bewegungsablauf jedoch vom Laborexperiment bzw dem Simulationsergebnis abweichen.

Die Pistenkollision ist ein **komplexer mechanischer Vorgang** und durch **Anstöße verschiedenster Körperteile** gekennzeichnet. Sie ist von Parametern wie Anprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel und Lage der Kontaktpunkte beeinflusst. Diese **Simulationseingangsinformation** kann aber oft nur anhand von Annahmen (zB abgeleitet von Zeugendarstellungen, Erfahrungswerten, dokumentierten Verletzungen etc) erstellt werden. Die **Brauchbarkeit** der Ergebnisse einer Simulation wird stark von der **Auswirkung dieser Eingangsparameter auf den individuellen Fall** abhängen und eine Variation kritischer Eingangsparameter (innerhalb des Konfidenzintervalls) wird immer notwendig sein.

6. Schlussfolgerung

Die Simulation kann verwendet werden, um das **grundsätzliche mechanische Verständnis einer Pistenkollision** zu verbessern; es können verschiedenste Aufprallvarianten in kürzester Zeit untersucht und analysiert werden. Viele Bewegungsvorgänge sind dabei offensichtlich, können aber **über das natürliche Verständnis hinaus veranschaulicht werden**. In den meisten Fällen

einer Pistenkollision mag der **Primäranprall gedanklich gut vorstellbar** sein, dessen **Einfluss auf den weiteren Bewegungsablauf** ist jedoch in den meisten Fällen **nicht trivial**.

Die **Komplexität** einer **Pistenkollision** kann nur mit einem **MKS simuliert** werden. Überlegungen, die auf dem Zusammenstoß zweier Körper (Zweikörperproblem) basieren, wie sie bei einem Kfz-Unfall gute Dienste erweisen, **sind nicht zulässig!**

Die Simulation kann die **physikalische (mechanische) Plausibilität** eines Bewegungsablaufs sicherstellen, weil in jedem Zeitpunkt des Bewegungsablaufs die mechanischen **Bewegungsgleichungen erfüllt** sind. Dies kann bei gedachten (und auch bei rein visualisierten) Abläufen nur bedingt der Fall sein!

Die Simulation kann dazu verwendet werden, einen **gedachten Bewegungsablauf zu bestätigen oder zu widerlegen** und damit eine geschilderte Version einer Pistenkollision zu priorisieren.

Die Genauigkeit der Vorhersagen ist an die **Zuverlässigkeit der Simulationseingangsbedingungen** geknüpft, daher müssen immer **Parameterspektren (innerhalb des Konfidenzintervalls)** untersucht werden, um glaubhafte Aussagen liefern zu können.

Anmerkungen:

- ¹ MKS-Simulationen sind integraler Bestandteil der Fahrzeugindustrie, um zB die Insassensicherheit in Unfallsituationen zu optimieren.
- ² Hier ist auch darauf hingewiesen, dass Laborexperimente nur auf ebenem Terrain durchgeführt werden können und, verglichen mit der Simulation, um ein Vielfaches teurer sind.

Korrespondenz:

*Dr. Thomas Christian Gasser,
E-Mail: gasser@kth.se.*

*Dr. Peter Eichelter,
E-Mail: peter.eichelter@aon.at.*

*Briefverkehr an:
SV Kanzlei Eichelter – Gasser,
Mariatrosterstraße 146, 8044 Graz*