

# Optimierung des paralympischen Sportgeräts Monoski durch kombinierten Einsatz von Inertialsensorik und Dämpfermesstechnik

(AZ 072021/16-17 und AZ 071613/17-18)

Maren Goll<sup>1</sup>, Patrick Vogl<sup>2</sup>, Felix Fechner<sup>2</sup>, Kilian Rauner<sup>2</sup>, Laura Trautner<sup>3</sup>, Emil Wörgötter<sup>3</sup>, Volker Junior<sup>3</sup>, Veit Senner<sup>2</sup> & Peter Spitzenpfeil<sup>1</sup> (Projektleitung)

<sup>1</sup>Technische Universität München, Fakultät für Sports- und Gesundheitswissenschaften, Angewandte Sportwissenschaft

<sup>2</sup>Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Professur für Sportgeräte und Materialien

<sup>3</sup>phoenix GmbH & Co. KG, München

## 1 Problemstellung

„Assistive equipment is fundamental for a person with a disability to participate and compete in winter sport activities. Although there have been improvements in the mechanical function of some assistive devices, the key issue is matching the residual function of the person with the assistive equipment” (Burkett, 2012).

Dieses Zitat definiert den Ausgangspunkt der Überlegungen für das Serviceprojekt, da auch für den Monoskisport die Herausforderung bezüglich optimaler materieller Bedingungen und der Abstimmung von Material auf Mensch besteht. Es handelt sich hierbei um ein rela-

tiv junges Forschungsfeld, denn international publiziert finden sich nur zwei Arbeiten, die das Thema Monoski thematisieren (Langelier et al., 2013; Cavacece et al., 2005).

### 1.1 Das Sportgerät

In der Klasse der sitzenden Aktiven stellt der sog. Monoski die Verbindung zwischen Mensch und Ski dar. Er setzt sich aus Sitzschale, tragender Rahmengeometrie und Stoßdämpfer (Feder-/Dämpfersystem) zusammen. Die gesamte Konstruktion ist wiederum durch eine handelsübliche Skibindung mit dem Ski verbunden. (vgl. Abb. 1 und 2).

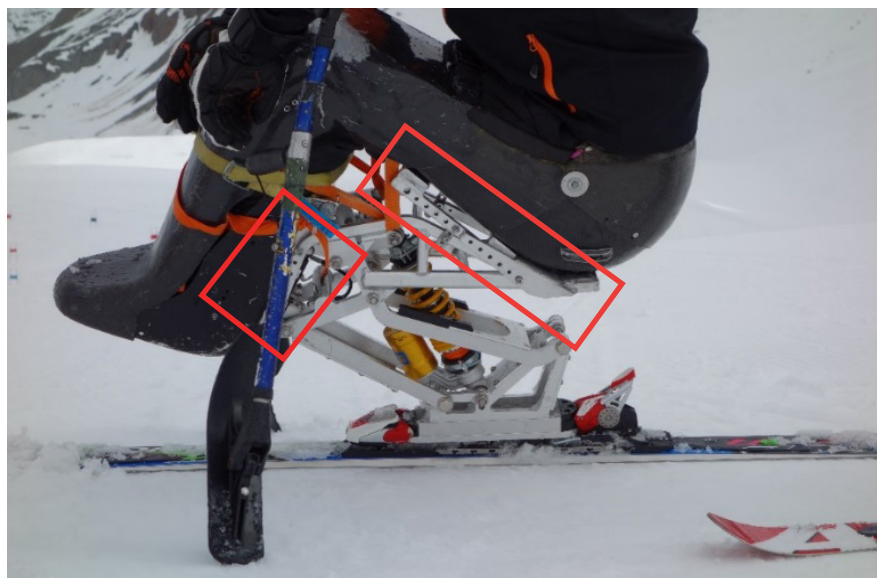


Abb. 1: Monoski mit variabler Rahmengeometrie: Neigungswinkel Fußrasten und Sitzwinkel (roter Kasten)

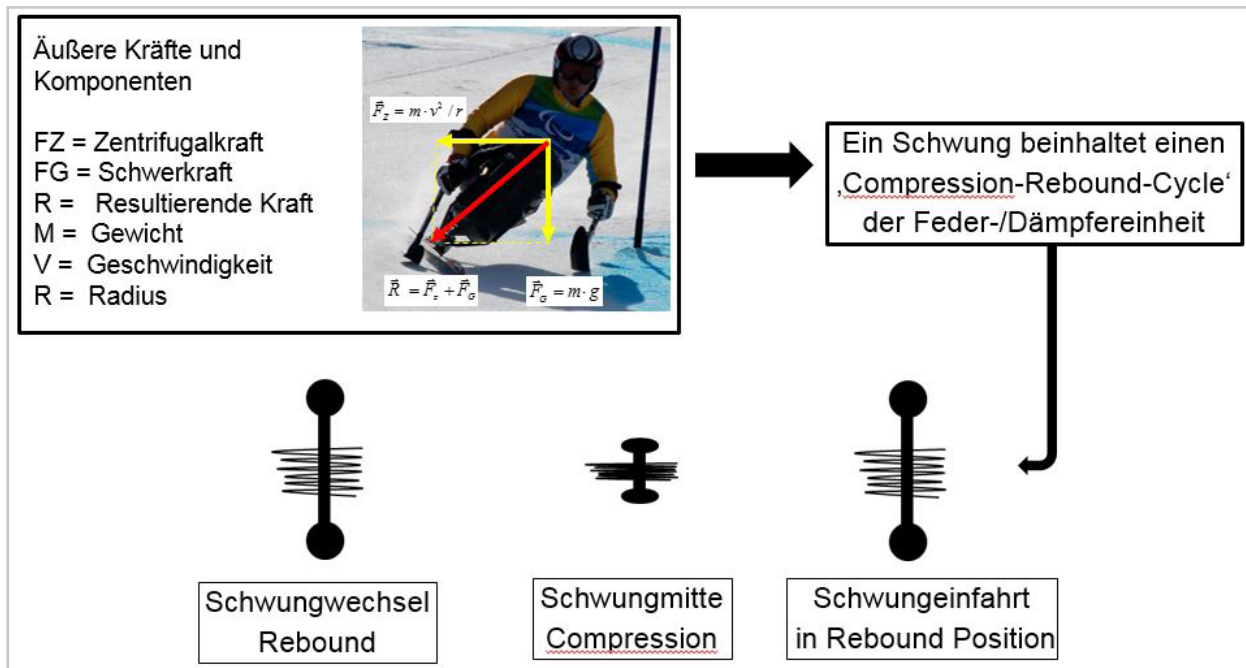


Abb. 2: Feder-/Dämpfersystem übernimmt die Arbeit der Beine und ist abhängig von äußeren Kräften

## 1.2 Funktionale Besonderheiten

Das Vollziehen der Druckregulation durch aktive Belastung (Hoch-Tief-Bewegung) in der Kurvenfahrt und das Ausgleichen von Unebenheiten ist für die Aktiven im Monoski aufgrund der fehlenden Kniefunktion selbst nicht möglich. Diese Funktion übernimmt der Stoßdämpfer des Monoskis. Während die Beine ein aktives System sind, arbeitet der Monoski jedoch als passives System, bzw. nur unter Einwirkung äußerer Kräfte. Die Stoßdämpfer-Einstellung in Kombination mit der Federhärte wird als Setup bezeichnet und nimmt Einfluss auf Parameter wie z. B. die Linienwahl oder Erhaltung des Bodenkontakts; ungünstige Einstellungen können hier das Sturzrisiko erhöhen oder sich in Tempoverlust ausdrücken. Insofern sind die gewählten Stoßdämpfereinstellungen ein wesentlicher Faktor für Erfolg im Wettkampf. Als zusätzliche variable Parameter kommen die unterschiedlichen Positionen der Streben des Rahmens, die Montageposition des Stoßdämpfers, die alpine Disziplin, die Strecke und die Schneebeschaffenheit hinzu.

Bisher richten sich alle Einstellungen, die am Sportgerät getätigt werden können, rein nach dem subjektiven Empfinden der Aktiven.

## 1.3 Funktionsweise des Dämpfers

Geschwindigkeit, Aufkantwinkel und Bauweise des Skis (Taillierung) definieren den Kurvenradius, in dessen Phasen von Kurvenerleitung und -steuerung bis Kurvenwechsel äußere Kräfte unterschiedlich stark wirken. Unter deren Einfluss wird das Feder-Dämpfersystem komprimiert (Compression) bzw. bei Abnahme der äußeren Kräfte wieder ausgefahren (Rebound), (vgl. Abb.3). Der Widerstand, bzw. die Geschwindigkeit der Ein- und Ausfederbewegung, lässt sich an den Stoßdämpfern regulieren. Abhängig von der Einstellung dieses Setups, ändert sich das Ansprechverhalten der Dämpfung und beeinflusst damit maßgeblich das Timing des Kurvenverlaufs. Damit stellt die Stoßdämpfung weniger eine Komfort-Komponente, sondern vielmehr ein leistungsbestimmendes Element im technisch-taktischen Bereich dar.

Dies wird deutlich, wenn man die Charakteristika der alpinen Disziplinen mit dem Verhalten des Stoßdämpfers (vertikale Oszillation) vergleicht. Hier sind vor allem zwei Aspekte zu nennen: zum einen die Schwingungsamplitude (Ausnutzen des Stoßdämpferwegs) und zum anderen die Schwingungsfrequenz (Zeit zwischen zwei Schwungwechseln), wie in Abb. 4 dargestellt.

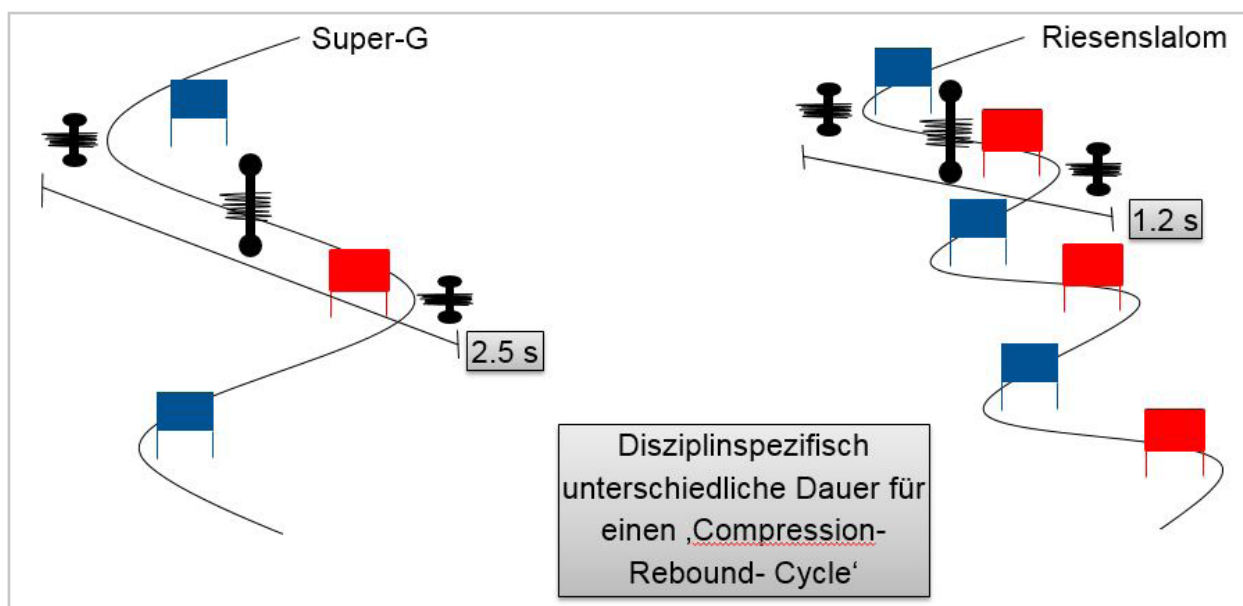


Abb. 3: Unterschiede in vertikaler Oszillation in Abhängigkeit der alpinen Wettkampfdisziplin für Super-G und Riesenslalom (konstruiertes Beispiel)



Abb. 4: Scan aller Bauteile, Erstellung der CAD Dateien und Zusammenführung der Baugruppe in das Gesamtmodell

Bei optimal gewählter Einstellung des Feder-Dämpfersystems ist die vertikale Oszillation perfekt auf die Disziplinspezifik abgestimmt, so dass von den Aktiven der kürzeste Weg gefahren werden kann.

Generell lassen sich, vereinfacht auf eine Schwingungsphase des Stoßdämpfers, folgende Unterschiede der Disziplinen festhalten: Die langsameren, technischen Disziplinen (SL, GS)

weisen schnellere Kantenwechsel mit niedrigeren Maximalkräften auf. Dies führt zu einer kürzeren Schwingungsperiode bei ähnlichen Amplituden des Stoßdämpfers, verglichen mit den Speed-Disziplinen (SG, DH). Als logische Schlussfolgerung erscheinen somit unterschiedliche Stoßdämpfereinstellungen in den verschiedenen alpinen Disziplinen sinnvoll.

Der Ansatz für Optimierungsprozesse lag deshalb zunächst auf einer Modellbildung, die Fragen aus folgenden Bereichen adressierte:

- › Stoßdämpfer (Feder-/Dämpferfunktion), bzw. Interaktion zwischen den Komponenten (Ausnutzen des Stoßdämpfer-Spektrums, Anteile High- and Lowspeed Dämpfung)
- › Rahmengeometrie und Auswirkungen von Veränderungen der selbigen
- › Optimierung der Einstellungen für die Disziplinen Slalom, Riesenslalom, Super-G und Abfahrt und Ausrichtung an der disziplinspezifischen vertikalen Schwungsdauer.
- › Optimierung der Stoßdämpfereinstellung für unterschiedliche Schneebeschaffenheiten (weich, eisig, hart, griffig).

## 2 Methodik

Die Grundlage der Optimierung bildete die Verwendung der Methode der Mehrkörpersysteme. Diese ermöglicht die Abbildung eines technischen Systems in einem mathematisch beschreibbaren Modell, wodurch das dynamische Verhalten des Monoskis untersucht werden kann. Bei der Modellbildung wird so die Realität in ein vereinfachtes Modell überführt. Ein gutes Modell ist dabei ein Kompromiss zwischen Vereinfachung und Komplexität. Eine höhere Komplexität führt hier nicht zwangsweise zu besseren Ergebnissen, sondern eventuell nur zu einer Erhöhung der Parameteranzahl und Vorhersagegenauigkeit. Eine zu starke Vereinfachung führt wiederum zur Vernachlässigung wesentlicher Eigenschaften, was die Aussagekraft des Modells schwächt. Deshalb ist es nötig, die Modellbildung nicht als vorgeordneten Prozess zu betrachten, sondern Modellbildung, Simulation und Validierung als iterativen Prozess zu verstehen (Rill und Schaeffer, 2014).

Vor diesem Hintergrund wurden für die systematische Optimierung vier Arbeitsschritte definiert:

- › **Schritt 1**
  - Erstellung eines Monoski-CAD-Modells durch den Kooperationspartner Phoenix GmbH & Co. KG
    - Scan der Monoski-Komponenten
    - Zusammenführung zu einer Baugruppe
- › **Schritt 2**
  - Überführung in Simulationsprogramm (Simpack, FRA)
    - Simulation des Schwingungsverhalten durch Krafteinleitung
    - Analyse der Skispezifik bzw. Disziplinspezifik (Amplitude der Schwingung entsprechend der jeweiligen Charakteristik der alpinen Disziplin)
- › **Schritt 3**
  - Anfertigung aller potentiellen Kennlinien des verwendeten Stoßdämpfers
    - Implementierung in Modell
    - Optimierung des Setups durch systematische Variation
- › **Schritt 4**
  - Feldtests und Validierung des Modells
  - Evaluation des Simulations-Optimums auf Basis real gemessener Situationen.

## 3 Ergebnisse

In den Arbeitsschritten 1 und 2 erfolgte die Modellbildung mit der Software Simpack (Dassault Systèmes, Paris, FRA), einer Mehrkörpersimulationssoftware für die dynamische Analyse von mechanischen oder mechatronischen Systemen. In diese Software wurden Bauteile des Monoskis, gewonnen aus der Überführung des physischen Modells, in CAD Dateien (Abb.5) eingespeist, wodurch ein Modell entstand, das in seinem dynamischen Schwingungsverhalten durch äußere Kräfte angeregt werden kann (Abb.6).

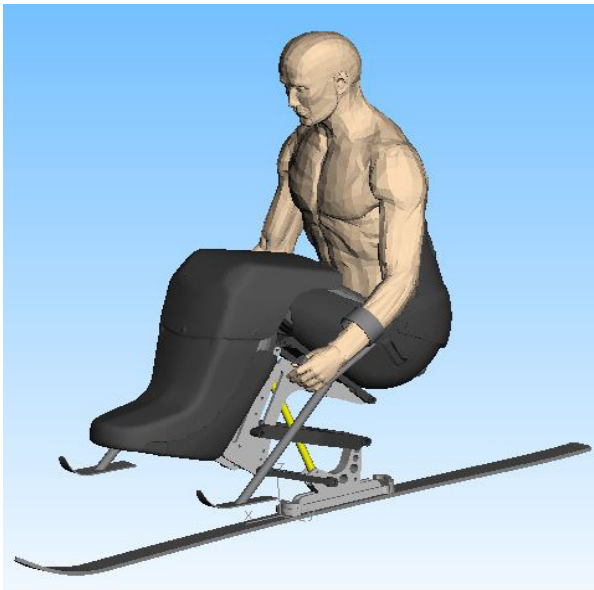


Abb. 5: Simpack-Darstellung nach Überführung der CAD Dateien. Krafteinleitung über gelbes Stoßdämpfermodell

Für die Einbindung des Stoßdämpfers wurde dieser in Arbeitsschritt 3 vermessen (Audi AG, Ingolstadt, Deutschland), wodurch die realen Feder- und Dämpfungskonstanten in das Modell integriert werden konnten.

In Arbeitsschritt 4 erfolgte schließlich die Modellvalidierung anhand des Vergleichs real gemessener Daten mit dem konstruierten Modell.

### 3.1 Modellvalidierung

Für die realen Messungen wurde als Datenlogger die Bodymotion Unit von 2D verwendet (2D Datarecording, Karlsruhe, Deutschland). Der Datenlogger wurde dabei in der Sitzschale

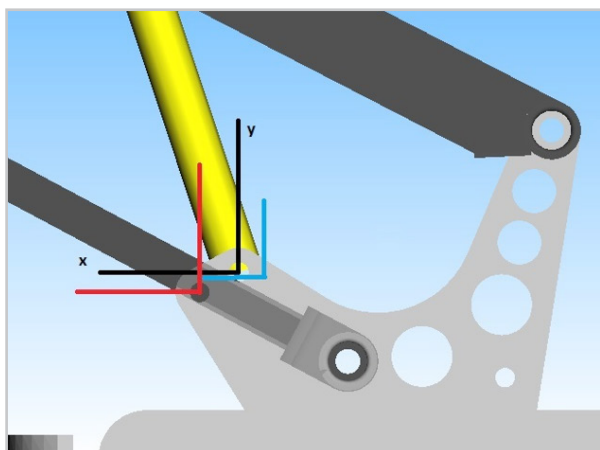


Abb. 7: Parametervariation der Montagepunkte des Dämpfers

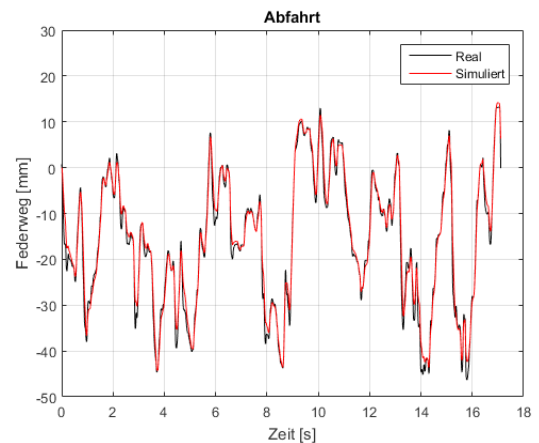
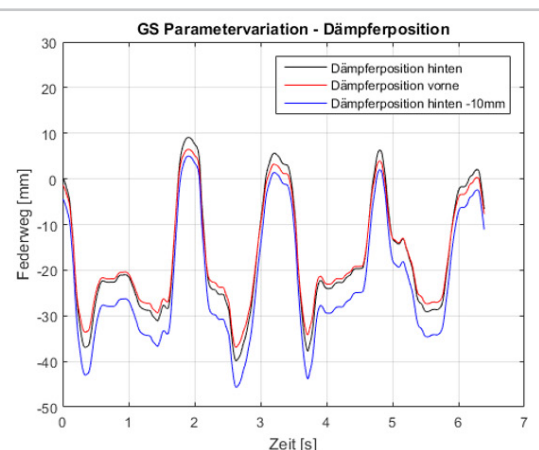


Abb. 6: Vergleich von realer Fahrt und Simulation am Beispiel der Disziplin Abfahrt

der Athleten positioniert. Er speicherte einerseits interne GPS-Daten, wie zum Beispiel die Geschwindigkeit und Höhe, und andererseits auch Daten aus externen Eingängen ab. Über den externen Eingang wurde ein Schiebepotentiometer angeschlossen, welches, parallel zur Feder angebracht, die Änderung des Federweges im Datenlogger abspeicherte.

Die erhobenen realen Daten wurden in das Modell überführt und auf Übereinstimmung mit der Simulation überprüft.

Die Validierung des Modells anhand real gemessener Kraftverläufe im Vergleich mit simulierten Kraftverläufen wies für alle Disziplinen eine sehr gute Übereinstimmung auf (Abb.7). Ebenso konnten unterschiedliche Federhärten, Dämpfereinstellungen, Dämpfermontagepunkte und Rahmen Geometrien dargestellt werden.



Parametervariation Montagepunkt des Dämpfers: Das schwarze Koordinatensystem ist die hintere Montageposition, das rote die vordere und das blaue die imaginäre Montageposition. Der geringere Winkel zur Vertikalen in der vorderen Position führt zu einer verringerten Amplitude. Ein größerer Winkel erhöht die Amplitude.

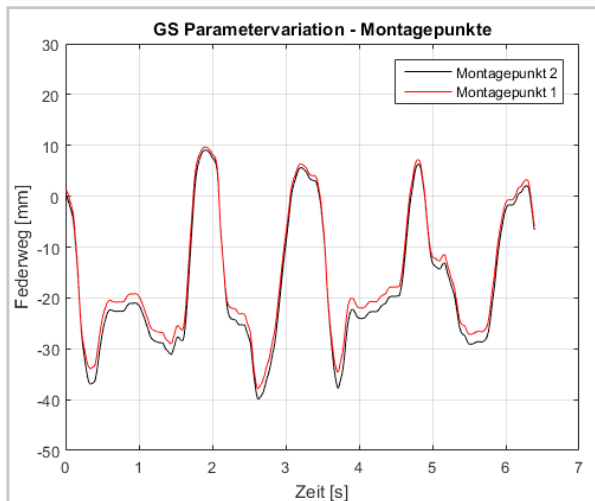


Abb. 8: Parametervariation des Montagepunkte der Rahmengeometrie

### 3.2 Optimierung des Schwingungsverhaltens

Die verwendeten Dämpfer verfügen über Einstelloptionen des Einfeder- und Ausfederwegs. Zudem besitzt der Dämpfer in Einfederichtung zwei Verstellmechanismen seiner Arbeitsweise, die die Dämpfungsgeschwindigkeit betreffen. Zum einen ist das der High-speed Bereich, der schnell hintereinander einwirkende Schläge dämpft und zum anderen den Low-Speed Bereich, der langsamere Einwirkungen abfängt, wobei die Einstellungen sich gegenseitig beeinflussen können.

Den Anfang der Optimierung des Dämpfersetings stellte die Vermessung jeder einzelnen der

drei Einstellungsoptionen in ihrer gesamten Bandbreite dar, ohne die beiden verbleibenden zu ändern. Mit dieser Methode wurde der Einfluss der jeweiligen Einstelloption auf die Optimierungskriterien aufgezeigt.

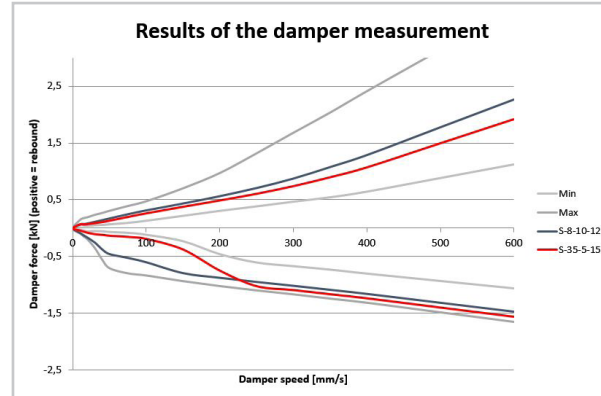


Abb. 10: Darstellung des Einflusses in den Dämpfungsgeschwindigkeitsbereichen

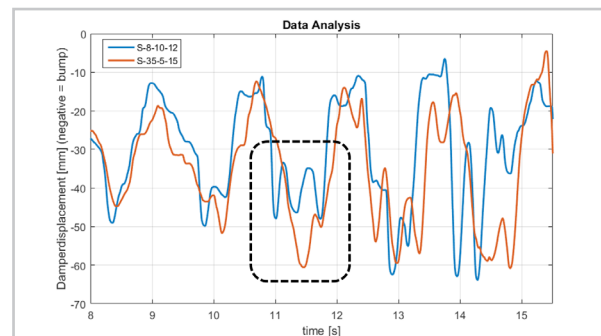


Abb. 11: Optimierung in realer Situation verdeutlicht an zwei Dämpfereinstellungen. Einstellung der Linie orange: weniger Schwingung, verbesserte Laufruhe.

Nachdem so die Variablen der Dämpfereinstellungen definiert waren, erfolgte die Simulation der kinematischen Optionen in den verschiedenen Sitzposition-Einstellungen.

Die Optimierung wurde dann für die vier alpinen Disziplinen durchgeführt, im Feld mit den Aktiven evaluiert (Protokoll: Laufzeit, subjektive

DOWNHILL best options						
SETTING	F_SCP_AVG	F_SCP_FIL_SDEV	X.CG_AVG	Z.CG_AVG	S_DAM_AVG	S_DAM_SDEV
S_10_10_8_hard_BPR_SP-1	-1217,0	167,86	-32,5	483,2	288,6	18,2
S_20_5_15_soft_BPR_SP-1.5	-1217,5	134,35	-38,0	484,6	289,7	18,8
S_25_20_15_soft_BPR_SP-1.5	-1217,7	151,49	-37,6	483,5	288,8	19,4

Abb. 9: Dämpfereinstellungsoptionen am Beispiel eines Athleten in der Disziplin Abfahrt

und objektive Einschätzung) und zum Abschluss zu einer Setup Matrix des jeweiligen Aktiven zusammengeführt.

Tab. 1: Monoski Setup Matrix am Beispiel eines Aktiven

	Slalom	Riesenslalom	Super-G	Downhill
<b>Torabstände</b>	6-13 m	25-30 m	>40	Geländeabhängig
<b>Charakteristik</b>	Technisch, Agilität	Technisch Agilität, Laufruhe	Geschwindigkeit, Kontrolle	Geschwindigkeit, Kontrolle
<b>Dämpfereinstellung</b>	S 35-5-15	S 30-10-10	S 25-20-15	S 20-5-15
<b>Sitzposition</b>	SP +1/SP+1.55	SP +1	SP -1	SP -1/-1.5
<b>Geometrie</b>	KIN B/A	KIN B/A	KIN B	KIN B
<b>Bedingungen weich</b>	LS & HS -2		LS & HS -4	
<b>Bedingungen eisig</b>	LS & HS +2		LS & HS +4	

## 4 Diskussion/Transfer Praxis

Nach Abschluss des Projektes bildet das bestehende Modell momentan zwei Typen an Monoskigeräten ab. Für Athletinnen bzw. Athleten, die zukünftig andere Monoski-Modelle wählen, muss wiederum eine eigenständige Modellerstellung erfolgen, was aber anhand der entwickelten Methodik grundsätzlich realisierbar ist. Insgesamt sind alle Ergebnisse des simulierten Modells, trotz der teilweise vereinfachten Annahmen, zufriedenstellend, und das Modell bildet eine gute Basis für die vorgenommenen Optimierungen des Feder- und Dämpfersystems.

Besonders wichtig ist die enge Zusammenarbeit mit den Aktiven für die Evaluation im Schnee. Ein trainingsbegleitendes Protokoll über die gewählten Einstellungen erwies sich als sehr geeignet, das Modell und die individuelle Matrix stetig zu verfeinern. Dadurch können die Aktiven die Einstellungen den Bedingungen anpassen, die sie vorfinden. Insgesamt lieferte das Projekt im Hinblick auf die paralympischen Spiele von Pyeongchang 2018 wertvolle Hilfestellung, insbesondere, da sich die Wetter- und Schneebedingungen als sehr wechselhaft präsentierten. Für Nachwuchsathleten bzw. -athletinnen können die gewonnenen Kenntnisse nun herangezogen werden, um von Beginn an unterstützend zu wirken, die individuelle optimale Einstellung für die sich präsentierende Situation zu wählen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Burkett, B. (2012). Paralympic sports medicine – current evidence in winter sport: considerations in the development of equipment standards for paralympic athletes. *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 22 (1), 46-50.
- Cavacece, M., Smarrini, F., Valentini, P. P. & Vita, L. (2005). Kinematic and dynamic analysis of a sit-ski to improve vibrational comfort. *Sports engineering*, 8, 13-25.
- Langelier, E., Martel, S., Millot, A., Lessard, J.-L., Smeesters, C. & Rancourt, D. (2013). A sit-ski design aimed at controlling centre of mass and inertia. *Journal of sports sciences*, 31 (10), 1064-1073.
- Rill, G. & Schaeffer, T. (2014). *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation. Vertieft in Matlab-Beispielen, Übungen und Anwendungen*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.