

Virtuelle Ski-Entwicklung

Simulation statt Feldtests

Schade eigentlich, könnte man meinen: Bei der Entwicklung von Alpinski lässt sich dank eines Prüfstands und neu entwickelter Simulationsmethoden der Ostschweizer Fachhochschule (OST) in Zukunft viel am Schreibtisch entwickeln, anstatt mithilfe aufwendiger Praxistests. Die Finite-Elemente-Methode ermittelt Daten zu Komfort, Stabilität und Wendigkeit von neuen Skimodellen. Ganz ohne den Menschen kommt das System allerdings nicht aus.

Bei einem Freeride-Ski kommt es auf den richtigen Mix aus Flexibilität, Gewicht und Steifigkeit an, um auch in schwierigem Gelände gut klarzukommen. Die Geometrie entscheidet über den Auftrieb im Tiefschnee. © zai



Die Entwicklung von Alpinski verbindet Ingenieurskunst mit den Anforderungen eines hochdynamischen Sportgeräts: Der Entwicklungsprozess reicht heute von der theoretischen Konzeption über die Materialauswahl bis hin zur praktischen Erprobung.

In jüngster Zeit stehen zwei Hauptaspekte hierbei im Vordergrund: die Finite-Elemente-Simulation zur Optimierung von Geometrie und Material sowie der Einsatz eines speziell entwickelten Prüfstands zur Validierung und Objektivierung der Skieigenschaften. Diese Ansätze haben das Potenzial, die Ent-

wicklung zu revolutionieren, indem insbesondere aufwendige Feldtests wegfallen, aber trotzdem die subjektive Wahrnehmung beim Skifahren berücksichtigt werden kann.

Ingenieurskunst trifft auf Freerider

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) hat sich in der Ingenieurwissenschaft als Standard zur Simulation von mechanischen und thermischen Prozessen etabliert. In der Skientwicklung ermöglicht sie eine genaue Analyse der Materialspannungen, Deformationen und

Strömungseigenschaften, ohne dass physische Prototypen notwendig sind. Die FEM liefert objektive Werte, die beispielsweise eine Dimensionierung von Deckschichten oder Kern ermöglichen – es ist aber schwierig, diese objektiven Werte mit dem subjektiven Fahrereindruck zu koppeln.

Im Innosuisse-Projekt „Holiski“, das einen ganzheitlichen (holistischen) Entwicklungsansatz für Alpinski verfolgt, hat das IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung zusammen mit dem Skihersteller zai Ansätze entwickelt, die vermehrt auf die virtuelle Aus-

Bild 1. Neuartige Geometrie eines Freeride-Skis für zai, entwickelt im Rahmen des „Holiski“-Projekts.

© OST



legung von neuen Skimodellen setzen. Durch FEM können Faktoren wie Auftrieb, Kurvenverhalten und Laufruhe simuliert werden, die auch vom Skifahrer subjektiv wahrgenommen werden. Dabei wird das Zusammenspiel der verschiedenen Schichten eines Skis – von der Lauffläche bis zur Dämpfungsschicht – analysiert und optimiert. Besonders bei Freeride-Skiern, die im Pulverschnee hohen Auftrieb erzeugen müssen, spielt die Geometrie eine entscheidende Rolle. Iterative Simulationszyklen liefern Geometrien, die theoretisch maximalen Auftrieb bei minimalem Widerstand bieten, die aber rein intuitiv kaum zugänglich wären (**Bild 1**).

Auf dem Prüfstand: Materialien aus Holz, Kork, Rezyklat und Fasern

Ein zentraler Bestandteil der FEM ist die Definition präziser Materialmodelle. Skier bestehen aus komplexen Materialverbunden: Holz, glas- und/oder kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, oder auch nachhaltige Werkstoffe kommen zum Einsatz. Diese Materialien müssen in der Simulation so beschrieben werden, dass

ihre Eigenschaften – wie Dämpfung, Steifigkeit und Elastizität – realistisch abgebildet werden. Fehlt ein genaues Materialmodell, können die Ergebnisse der FEM deutlich von der Realität abweichen. Dies hat schließlich auch eine Auswirkung auf das Fahrerlebnis, weshalb der Ermittlung des Materialverhaltens – auch in der Kombination im Ski – eine große Bedeutung zukommt.

In letzter Konsequenz ersetzt oder reduziert die Simulation kostspielige Testzyklen, da die Skieigenschaften bereits im virtuellen Modell evaluiert werden können. Zusätzlich erlaubt sie die Untersuchung von Szenarien, die in der Realität schwer reproduzierbar sind, etwa das Verhalten unter extremen Lasten oder bei unterschiedlichen Schneearten.

Schließlich werden auch sehr schwer messbare Größen zugänglich, wie z.B. die Anströmung des Skis während der Fahrt – diese können beispielsweise in einem Windkanal verifiziert werden, sind bis heute aber kaum untersucht worden. Die Ergebnisse aus diesen Betrachtungen können ebenfalls zu sehr ungewöhnlichen Designs führen, die wieder-

um bezüglich des Fahrverhaltens analysiert werden müssen (**Bild 2**).

„Den“ optimalen Ski gibt es nicht – jeder Nutzer empfindet anders

Obwohl die FEM enorme Vorteile bietet, gibt es auch Herausforderungen. Die Komplexität des Zusammenspiels zwischen Schnee, Ski und Fahrer ist schwer in Modellen abzubilden. Schneebedingungen ändern sich dynamisch und variieren je nach Temperatur, Dichte und Feuchtigkeit. Diese Variabilität macht es schwierig, allgemeingültige Aussagen aus einer Simulation abzuleiten. Zusätzlich spielt die subjektive Wahrnehmung der Skifahrer eine bedeutende Rolle. Selbst ein Ski, der objektiv als optimal bewertet wird, kann bei verschiedenen Fahrern unterschiedliche Reaktionen hervorrufen – nicht jede Testperson beurteilt einen Ski gleich. Es wird also auch in Zukunft nicht möglich sein, Ski (oder auch andere Sportgeräte) rein virtuell zu entwickeln.

Skiprüfstand zur Ermittlung von Materialdaten und zur Validierung

Ein zentraler Bestandteil der Skientwicklung ist der von der Ostschweizer Fachhochschule (OST) und zai entwickelte Prüfstand. Dieses Gerät wurde speziell konzipiert, um die mechanischen Eigenschaften von Skiern unter standardisierten Bedingungen zu testen.

Die Skiprüfung ist generell wenig normiert oder standardisiert – auch dies ist eine Folge der eher iterativen Entwicklung, wobei neue Modelle aufgebaut und individuell durch Testpersonen beurteilt werden, aber kaum Messungen stattfinden. Die wichtigsten Parameter, die das Fahrverhalten beeinflussen und mit einem Prüfstand nachvollzogen werden können, sind: »

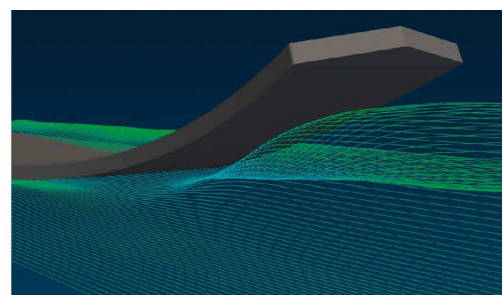
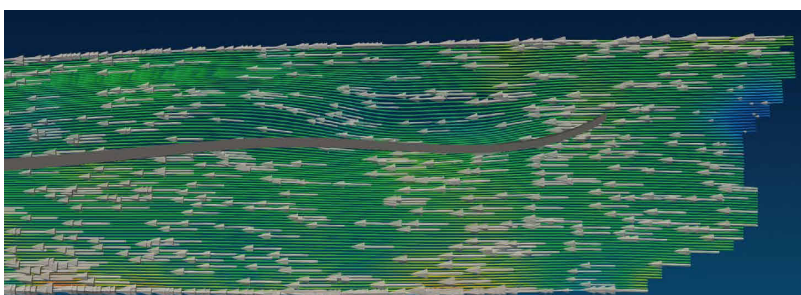


Bild 2. Strömungssimulation mit einer Anströmgeschwindigkeit von 12 m/s. © OST

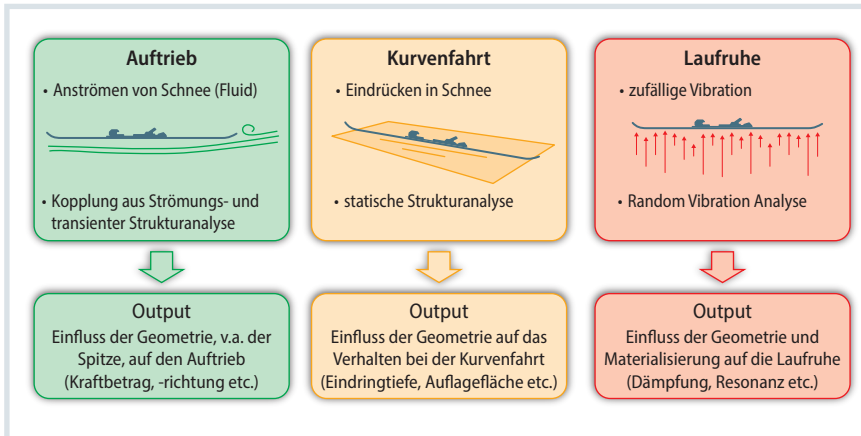


Bild 3. Simulations- und messbasierte Effekte und deren Einfluss auf das Fahrgefühl. © OST

Simulieren, Bauen, Probefahren: Ski-Kurs für Studierende

Im Rahmen der sogenannten interdisziplinären Kontextmodule wird im Frühlingsemester 2025 an der OST erstmals der Kurs „Ski-Nation Schweiz“ durchgeführt. Die Studierenden beleuchten dabei den Skisport von unterschiedlichen Seiten und bauen als zentrales Element ein Paar Freeride-Ski auf, die einige Wochen später auch im Skigebiet Disentis/Sedrun getestet werden.

Neben der Mechanik und der Technologie des Skibaus werden auch andere Aspekte erarbeitet: Was sind die ökologischen Bedingungen

und Folgen des Wintersports heute und in näherer Zukunft? Welche gesundheitlichen Effekte hat das Skifahren als Volkssport in der Gesellschaft? Welche Industriezweige in der Schweiz und Europa profitieren direkt oder indirekt vom Schneesport?

Die Resultate der Untersuchungen stellen die Studierenden in Vorträgen und in einer Videodokumentation zusammen. Als interdisziplinäres Modul steht die Veranstaltung allen Studiengängen der Ostschweizer Fachhochschule zur Verfügung.

- Schwingungsmessung: Bestimmung der Dämpfung und Eigenfrequenzen. Hier ist ein direkter Einfluss von Geometrie und Materialkombination auf die Laufruhe/Vibration feststellbar.
- Biegemessung: Ermittlung der Steifigkeit und resultierende Durchbiegung unter Belastung. Diese von Materialisierung und Geometrie abhängigen Parameter sind für eine Reihe von Fahreigenschaften wie Reaktionsgeschwindigkeit und Fehlerverzeihlichkeit verantwortlich.

Prüfung des Skis in Abschnitten

Der Prüfstand wird einerseits eingesetzt, um Material- und Geometrieigenschaften zu ermitteln, und andererseits, um Skimodelle aus der FEM mit aufgebauten Prototypen oder Subkomponenten zu überprüfen. So werden beispielsweise einzelne Abschnitte des Skis geprüft, die deutlich einfacher zu produzieren sind als ein kompletter Ski. Die gewonnenen Daten erlauben eine direkte Gegenüber-

stellung mit den Ergebnissen aus der Simulation. So können potenzielle Diskrepanzen aufgedeckt und die Modelle weiter verfeinert werden (**Bild 3**).

Neben den Standardtests bietet der Prüfstand auch Möglichkeiten zur Untersuchung innovativer Materialkombinationen. Beispielsweise werden nachhaltige Materialien wie Kork oder recycelte Kunststoffe getestet, um ihre Eignung als Ersatz für erdölbasierte Werkstoffe zu überprüfen und längerfristig Bestandteile des Skis auch wiederzuverwenden. Allerdings dürfen diese Maßnahmen keinesfalls zu Nachteilen bei der Performance führen.

Zusätzliche Messungen objektiver Art können aber auch mit individuellen Tests kombiniert werden. Wie in Bild 3 visualisiert, spielt z.B. auch die Eindringtiefe in den Schnee eine wichtige Rolle – diese kann einerseits simuliert, andererseits aber (für unterschiedliche Winkel) auch gemessen werden (**Bild 5**).

Aktuelle Erweiterungen des Prüfstands verbessern die Benutzerfreund-

lichkeit und Messgenauigkeit. Beispielsweise wurde ein automatisierter Mechanismus zur Aufzeichnung der Biegelinie eingeführt, der zuvor manuelle und fehleranfällige Prozesse ersetzt. Die Integration moderner Sensorik und Datenverarbeitung ermöglicht eine schnellere und präzisere Analyse – ebenfalls Voraussetzungen für einen effizienten Entwicklungsprozess (**Bild 4**).

Grenzen der virtuellen Entwicklung

Ein wesentlicher Aspekt der Skientwicklung ist die subjektive Wahrnehmung der Skifahrenenden. Aspekte wie Komfort, Stabilität und Wendigkeit lassen sich nur begrenzt durch technische Parameter beschreiben. Um diese Kluft zu überbrücken, werden objektive Messdaten mit subjektiven Eindrücken kombiniert.

Um die subjektive Wahrnehmung besser zu verstehen, werden Testfahrten durchgeführt, bei denen Fahrer ihre Eindrücke detailliert dokumentieren. Diese werden mit den objektiven Daten aus der Simulation und den Ergebnissen vom Prüfstand abgeglichen. Dabei zeigt sich oft, dass Unterschiede in der Fahrweise oder den Erwartungen der Fahrer zu abweichenden Beurteilungen führen können – ein Effekt, der nicht verhindert werden kann.

Das Konzept des „digitalen Zwillings“ bietet hier zumindest einen Lösungsansatz: Durch die Verknüpfung von Simulationsergebnissen, Prüfstandsmessungen und subjektiven Testergebnissen entstehen komplexe Simulationsmodelle, die sowohl die physikalischen Eigenschaften als auch die gefühlte Performance eines Skis abbilden können. Diese Modelle können verwendet werden, um bereits in der Entwicklungsphase die Wirkung bestimmter Änderungen auf das Fahrgefühl vorherzusagen, um damit Entwicklungszyklen einzusparen.

Zukunft der Skientwicklung: Kombi aus FEM, Praxis und neuen Werkstoffen

Die Kombination aus FEM und Prüfstand hat die Entwicklung von Skiern auf ein neues Niveau gehoben. Während die Simulation frühzeitig Erkenntnisse liefert und Testzyklen reduziert, stellt der Prüfstand sicher, dass die Ergebnisse der realen Nutzung standhalten. Die größte

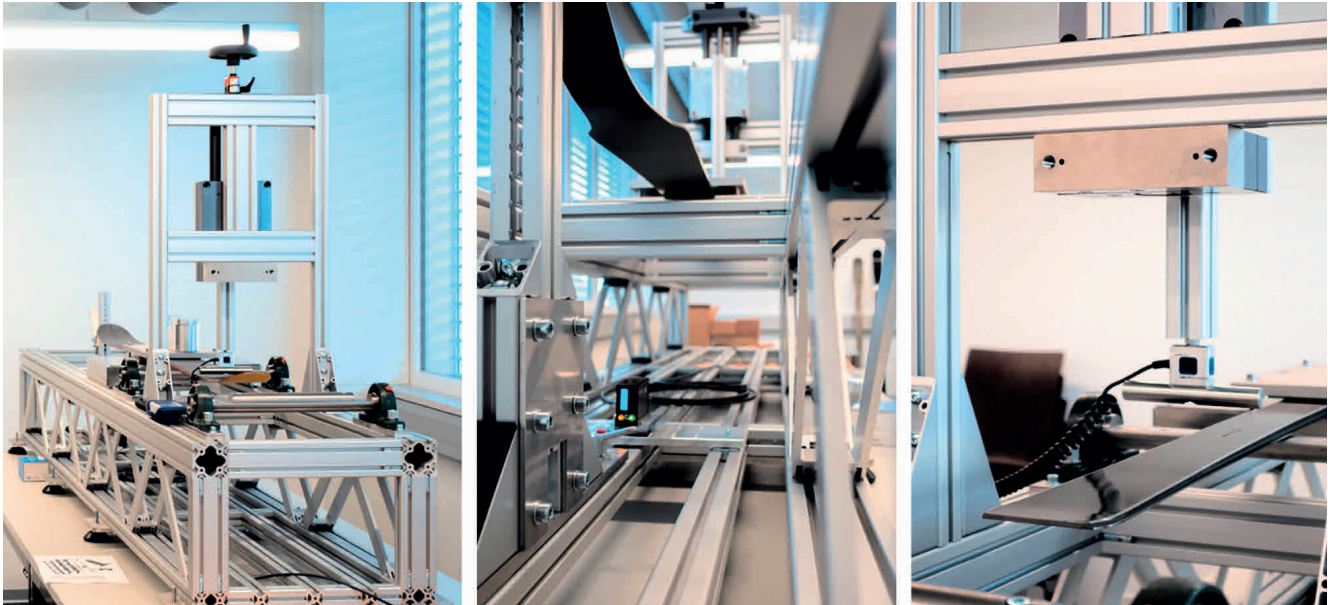


Bild 4. Am IWK entwickelter Skiprüfstand zur objektiven Messung typischer Parameter. © OST

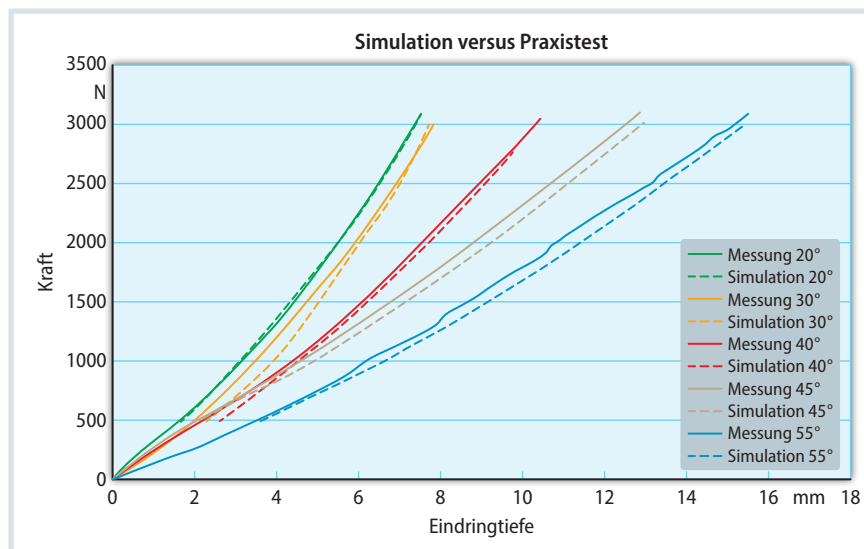


Bild 5. Vergleich von Simulation und Experiment bezüglich Eindringtiefe im Schnee, in Abhängigkeit des Anstellwinkels. Quelle: OST; Grafik: © Hanser

Herausforderung bleibt jedoch die Berücksichtigung der individuellen Fahrerfahrung.

Ein weiterer Trend in der Skientwicklung ist die Integration nachhaltiger Materialien und Fertigungsmethoden. Unternehmen wie zai oder Stöckli arbeiten daran, neue Materialien oder Materialkombinationen in ihren Produkten einzusetzen. Die Herausforderung liegt darin, die gleiche Performance wie bei traditionellen Werkstoffen zu erreichen. Neben den Materialien kann in diesem Zusammenhang auch die Bauweise hinterfragt werden: Völlig neuartige Konzepte bezüglich des Designs ermöglichen auch völlig andere Materia-

lien, allerdings bestehen hier nur sehr eingeschränkte Erfahrungen und ein recht großes Risiko, das Fahrverhalten negativ zu beeinflussen. Ein langsames Herantasten an neue Designs, z.B. durch Simulation und parallele Test von typischen Funktionsmustern, stellt den ersten Schritt zu einem neuartigen Aufbau dar.

Zukünftige Entwicklungen werden sich darauf konzentrieren, digitale Technologien noch stärker in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Beispielsweise können maschinelles Lernen und KI genutzt werden, um aus den Daten vergangener Projekte Muster zu erkennen und Vorhersagen für neue

Designs zu treffen – inklusive der individuellen Fahreindrücke unterschiedlicher Testpersonen. Dies kann die Entwicklungszeiten weiter verkürzen und die Kosten senken.

Fazit

Die Kombination aus Simulation, Prüfstand und subjektiver Wahrnehmung ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Skientwicklung. Mit diesen Ansätzen stehen die Chancen gut, dass die nächste Generation von Alpinski noch leistungsfähiger, nachhaltiger und benutzerorientierter wird. Gleichzeitig zeigt sich, dass technische Innovationen und die individuelle Erfahrung der Skifahrer untrennbar miteinander verbunden bleiben. Die Zukunft gehört hybriden Modellen, die Wissenschaft und Fahrkultur vereinen. ■

Info

Text

Prof. Dr. Gion Andrea Barandun ist Leiter des Fachbereichs Faserverbundtechnik / Leichtbau am IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung an der Ostschweizer Fachhochschule OST in Rapperswil/Schweiz.

Benedikt Germanier ist CEO von zai.

Dominik Stapf ist Leiter der Prüftechnik am IWK und Dozent an der OST.

www.ost.ch