

# Grundlagen des differenziellen Lernens beim alpinen Skifahren

## Teil 1: Wissenschaftstheoretische und biomechanische Aspekte des alpinen Skisports

In schwierigen Zeiten wächst die Sehnsucht nach einfachen Antworten. Eine der einfachen Antworten auf mangelnden Erfolg und daraus resultierende Forderungen im Sport allgemein und beim Skifahren im Speziellen lautet: Mehr Umfänge trainieren und die Intensitäten steigern bzw. konditionelle Fähigkeiten verbessern. Eine eher koordinations- oder technikorientierte Variante solcher einfacher Lösungen führt nicht selten zum Versuch phänomenologischer Kopierung der momentan weltbesten Athleten. Betrachten wir die Vielzahl an unterschiedlichen Skifahrertechniken, die es erlauben, zur Weltspitze zu gehören, so treten Schwierigkeiten für eine Begründung allgemeingültiger „Leitbilder“ auf. Berücksichtigen wir zusätzlich das äußerst seltene Auftreten identischer Fahrertechniken und -stile in der Weltspitze trotz zahlreicher Kopierversuche, lässt

sich an dem Konzept des Lernens durch Nachahmung prinzipiell zweifeln. Fragwürdig erscheint hier vor allem der auf die Bewegungstechnik bezogene Sinn von Leitbildern im Rahmen eines motorischen Lernprozesses bei Schülern und Jugendlichen in einer Sportart wie dem Skisport, in der sich die Randbedingungen (Material, Ausrüstung etc.) bis zum erhofften Erfolgsalter öfter und die so genannten „Leitbilder“ mehrfach geändert haben (zur Problematik der Verwendung des Begriffs Leitbild vgl. auch Adorno, 1967; Schöllhorn, 2001). Inhaltlich logische Probleme treten auf, wenn sich Gruppen, Schulen oder eine ganze Nation an einzelnen Weltbesten orientieren, da doch gerade ein Charakteristikum von Ausnahmeathletinnen und -athleten (den Besten) ist, dass sie sich nicht so verhalten wie die Masse. Selbst die Begründung der engen Orientierung an biome-

chanischen Normwerten im Bereich des Skifahrens bereitet bei genauerem Hinsehen grundlegende Probleme, sind sie doch meist statistischer Natur und demnach per definitionem an Gruppen abgeleitet und daher nur eingeschränkt im Detail für einzelne Athleten zutreffend bzw. auf diese übertragbar. Die Autoren arbeiten im Folgenden die Grundlagen des recht jungen, in der Weltspitze aber schon länger implizit angewendeten Techniktrainingsansatzes des differenziellen Lernens und Lehrens für den alpinen Skisport auf. Durch veränderte Annahmen von und Sichtweisen auf aktuelle Lehrmeinungen werden praktische Konsequenzen für ein effektiveres Training im alpinen Skisport gezogen (Teil 2).

Eingegangen: 22.12.2006

### 1. Probleme klassischer Lehransätze

Aus wissenschaftstheoretischer Sicht können die Grundlagen klassischer Lehransätze im alpinen Skisport als Modelle betrachtet werden, die meist – je nach mutterwissenschaftlichem Hintergrund – unter bestimmten Annahmen erstellt wurden und in jedem Fall eine vereinfachte Abbildung eines beobachteten Phänomens bzw. Modelloriginals darstellen (Stachowiak, 1973; Harbordt, 1974; Ballreich & Baumann, 1996). Der Grad der Vereinfachung wird dabei vorab in einem aktiven Prozess vom Modellersteller (im Allgemeinen Wissenschaftler) mit dem Modellzweck festgelegt. Vom Grad der Vereinfachung hängt dann sowohl das Potenzial der Verallgemeinerung des Modells als auch der Umfang der vernachlässigten Phänomene ab.

In enger Verbindung mit der Wahl des Modells steht hier der Entwurf des Untersuchungsdesigns, dessen Durchführung sich nur auf die im Rahmen des Modells gestellten Fragen bzw. Hypothesen beziehen kann. Wird also im Rahmen einer Untersuchung eine Fragestellung bzw. Hypothese nicht bestätigt oder widerlegt, so stellt dies im Sinne des Falsifikationsprinzips nach Popper (Popper, 1989) keinen endgültigen Nachweis für deren Widerlegung dar, sondern zeigt bestenfalls, dass dies mit Hilfe des

gewählten Modells und Untersuchungsdesigns nicht überprüfbar war, also ebenso eine ungeeignete Methodik für das konstruierte Problem ausgewählt worden sein könnte (Feyerabend, 2002). Im gleichen Maße als problematisch gelten Schlussfolgerungen von nicht nachweisbaren Strukturen auf alternative Strukturen, bevor diese explizit überprüft wurden (Brügge-mann et al., 1992). Sind in beiden Fällen auf wissenschaftstheoretischer Seite noch relativ wenige Konsequenzen mit solchen logischen Fehlschlüssen verbunden, so erhalten beide Probleme eine nahezu gefährliche Komponente, wenn diese unreflektiert Einzug in Lehrpläne erhalten.

Analysiert man nationenübergreifend Lehrkonzepte im Bereich des alpinen Skisports, so offenbaren sich neben den wissenschafts-/erkenntnistheoretischen Schwierigkeiten unterschiedliche Problembereiche. Im Folgenden werden drei Problembereiche diskutiert, die grundlegend die theoretische und praktische Entwicklung der Sportart „alpiner Skilauf“ beeinflussen. Sie werden hier zwar getrennt behandelt in Theorie und Praxis, erfahren jedoch wechselseitige Beeinflussung:

- Umgang mit physikalischen und biomechanischen Gesetzmäßigkeiten,
- personenbezogene Untersuchungsdesigns,
- Ableiten praktischer Konsequenzen.

### Zum Umgang mit physikalischen und biomechanischen Gesetzmäßigkeiten

Auf einer ersten Ebene können deterministische von indeterministischen Gesetzen unterschieden werden (Ballreich, 1976). Während die eher deterministisch angelegten physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine wesentlich geringere Toleranz gegenüber Abweichungen aufweisen, dafür jedoch exaktere Randbedingungen benötigen, weisen die eher statistisch angelegten biomechanischen Gesetzmäßigkeiten weniger Exaktheit auf, da sie meist mit größeren Wertebereichen verbunden sind (Ballreich & Baumann, 1996). Zur Erlangung einer vergleichbaren Präzision wären für die Erstellung biomechanischer Normwerte erheblich umfangreichere Angaben von Randbedingungen notwendig. In Abhängigkeit von dem Anspruch der Präzision der Modellierung treten Schwierigkeiten beim Transfer auf die konkrete Praxis des Skifahrens auf. Bei grober Betrachtung birgt eine Übertragung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf das Skifahren weit weniger Probleme als der Versuch des Transfers im Detail. Dies bedeutet nicht, dass die Gesetzmäßigkeiten keine Gültigkeit mehr zeigen, sondern dass andere Gesetzmäßigkeiten in Form von Zusatztermen eine größere Bedeutung erlangen. Hierzu gehören die Reibungsterme für die Luft

und den Schnee, die mit zunehmender Geschwindigkeit an Einfluss auf das Fahrverhalten gewinnen. Probleme des Transfers der allgemeinen physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf das Skifahren treten also zum einen durch den Anspruch des Modellierers, zum anderen durch die Spezifik der Sportart auf. Da die Randbedingungen sich zeitlich ständig verändern, sind für entsprechend präzise Aussagen in Bezug auf die Abfahrtsgeschwindigkeit die Randbedingungen als zeitlich veränderliche Funktionen anzugeben und nicht als Konstanten. Sollen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu jedem Zeitpunkt einer Abfahrt Anwendung finden, dann sind z.B. auch die entsprechenden äußeren Randbedingungen der Gleichungssysteme zu jedem Zeitpunkt anzupassen. So ändert sich z.B. der Gleitwiderstand des Skis kontinuierlich in Abhängigkeit von der Struktur des Wasserfilms, der sich während der Abfahrt zwischen Ski und Untergrund bildet. Problematisch dabei ist, dass dieser wiederum von der Struktur des Schnees inklusive der Außentemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der geographischen Höhe, der Druckverteilung und der Fahrtgeschwindigkeit abhängt. Selbst wenn wir von relativ konstanten äußeren Witterungsbedingungen ausgehen, kann der Schnee immer noch durch verschiedenste Kombinationen aus Wärme, die durch die Gleitreibung entsteht, und Druck zum Wasserfilm unter dem Ski schmelzen. Da sich mit einer Abfahrt meist auch die Höhe und damit der Luftdruck ändern, ist von einer zusätzlichen Änderung der Schneestruktur im Rahmen der selben Abfahrt mehrfach zu rechnen. Wird neben der Ski-Schnee-Einheit noch der Athlet selbst mit all seinen Freiheitsgraden berücksichtigt, dann wird das Gleichungssystem für ein deterministisches Modell entsprechend komplexer, wie weiter unten im Detail besprochen (s. a. Lind & Sanders, 2006). Allgemeine physikalische oder biomechanische Gesetzmäßigkeiten dienen also je nach Fragestellung des Betrachters in erster Linie der mathematischen Beschreibung einer Klasse von Phänomenen, die zu Lasten der Genauigkeit im Einzelfall gehen. In der Folge sind Anwendungen der Modelle auf einzelne Athleten oder ausgewählte Zeitpunkte entsprechend unscharf.

## Zu Problemen von Untersuchungsdesigns

Ein grundlegendes Problem in der Ableitung praktischer Konsequenzen aus biomechanischen Erkenntnissen kann in einer bislang wissenschaftstheoretisch problematischen Vorgehensweise gesehen werden, wie sie meist bei der Konzeption von Versuchsplänen zum Auffinden indeterministischer Aussagen Anwendung findet. Hier wird aus den Unterschieden von zwei zeitlich relativ entfernten Zuständen von Anfängern (Novizen) und Fortgeschrittenen (Experten) mehr oder weniger direkt auf Ansteuerungs-/Trainingsmaßnahmen speziell in Bezug auf die erhobenen Merkmale geschlossen. Auf den ersten Blick plausibel offenbaren sich bei detaillierter Betrachtung zwei grundlegende Problembereiche dieser Vorgehenswei-

se. Der eine bezieht sich auf die Zulässigkeit der Schlussfolgerung von dem (schlechteren) Zustand eines Athleten auf den (vermeintlich besseren) Zustand eines anderen Athleten, der andere steht in Verbindung mit der Historie des vermeintlich besseren Athleten. Im ersten Fall scheint es aufgrund der hohen Individualität beider Athleten vor allem in Bezug auf die komplexen Alternativen und Kompensationsmöglichkeiten relativ unwahrscheinlich, dass beide Athleten exakt aufgrund des selben Merkmals gleich erfolgreich sind. Nicht berücksichtigt ist hier die Möglichkeit der Ansteuerung eines Merkmals aufgrund latenter Faktoren. Das Problem der Historie eines Athleten bezieht sich im engeren Sinn auf die Bedingungen des Lehrwegs seitens des erfolgreicherer Athleten. Durchlief dieser Athlet das gleiche Ausbildungskonzept, dem er nun als Vorbild dient, so kommt die Diagnostik eher einer Überprüfung des Ausbildungskonzepts gleich als einer Leistungsdiagnostik im Sinne eines offenen Leistungssystems.

In Bezug auf die meist angewendeten Untersuchungsdesigns zur Gewinnung biomechanischer Gesetzmäßigkeiten können personenbezogen grob zwei Orientierungen unterschieden werden: eine an der Gruppe und eine am Individuum. Ein häufiges Problem beider Ansätze ist dabei, dass sowohl die Gruppen als auch die Individuen vorab nach subjektiven Kriterien in Untersuchungseinheiten eingeteilt werden. Diese subjektiven Kriterien bergen jedoch die Schwierigkeit, dass sie meist aus bestehenden Lehrmeinungen abgeleitet sind und damit dem gleichen Problem von der Entstehung wissenschaftlicher Tatsachen unterliegen (Fleck, 1935). Wissenschaftstheoretisch nicht ganz unproblematisch sind in solchen Fällen Schlussfolgerungen auf die Gesamtheit. In der Mehrzahl der Untersuchungen wird leider irrtümlich mit dem Auffinden eines statistisch signifikanten Ergebnisses unmittelbar auf die Gültigkeit einer Hypothese geschlossen, wenn gleich das Ergebnis nur Schlussfolgerungen über die Daten unter der Annahme der Hypothese zulässt (Gigerenzer, 2002). Besonders kritisch in diesem Zusammenhang ist der Umgang mit Individualität zu betrachten (vgl. hierzu Schöllhorn, Beckmann & Michelbrink, 2005).

Ein wissenschaftlicher Nachweis von Individualität ist in etwa zu vergleichen mit einer Personenerkennung im Rahmen von Sicherheitssystemen und ist durch eine spezielle Methodik zu gewährleisten (Sokal & Rohlf, 1994). Neben mehrfachen Wiederholungen in unterschiedlichen Situationen sind relativ umfangreiche Stichproben dafür notwendig. Werden hingegen bei einem Slalomlauf in einem Merkmal genau so viele charakteristische Kurven wie Individuen identifiziert (Brüggemann et al., 1992), so ist dies lediglich ein Zeichen für eine hinreichend hohe Auflösung des Messsystems und einen Mangel an Auffinden einer möglichen Klassifizierung, jedoch kein Nachweis für individuelles Bewegungsverhalten. Im eigentlichen Sinne wird hier also Individualität nicht überprüft, sondern schon als Voraussetzung in die Untersuchung hinein gegeben.

Von den in der Mehrzahl angewendeten Hypothesen-überprüfenden oder konfirmatorischen Ansätzen zu unterscheiden sind Hypothesengenerierende oder explorative Ansätze (Tukey, 1980), die im Wesentlichen Charakteristika der Einzelelemente als Ausgang nehmen und diese anhand ihrer Ähnlichkeiten klassifizieren. Clusteranalytische Realisierungen dieser Ansätze im Bereich des Skisports führen im Groben zu technikspezifischen Gruppierungen (Müller, 1987) und in der Feinstruktur zum „echten“ Nachweis individueller, technikübergreifender Abfahrtstechniken (Schöllhorn, Müller, Raschner, Schwameder & Benko, 2001).

## Zu Problemen der Ableitung praktischer Konsequenzen

In der praktischen Konsequenz werden aus den physikalischen und biomechanischen Erkenntnissen neben den materiellen Anforderungen im Allgemeinen klassische Empfehlungen zur alters- und leistungsabhängigen Technikanpassung an die jeweils veränderten Materialbedingungen auf phänomenologischer Ebene abgeleitet. Auf eher konditioneller Ebene werden überwiegend maximale Kräfte im Zusammenhang mit klassischen Krafttrainingsmethoden thematisiert (Raschner, 1997). Sowohl der koordinativen als auch konditionellen Ebene zuzuordnen sind Ansätze zur Verbesserung neuromuskulärer Adaptation durch Vibrationstraining (Mester et al., 2000). Das Plädoyer für eine Individualisierung der Skitechnik aus handlungstheoretischen Überlegungen heraus (Brüggemann et al., 1992) führt zwar zu einer gesteigerten Toleranz gegenüber Abweichungen von zu engen Vorstellungen eines Technikideals, geht jedoch in den indirekt abgeleiteten praktischen Empfehlungen nicht über das sportartübergreifende Trainingsprinzip der Individualität nach Matwejew (1956) in abgeschwächter Form von leistungs- und altersspezifischer Differenzierung von Lerngruppen hinaus. Konkrete Empfehlungen zum Erreichen einer individuellen Technik werden im Allgemeinen vermieden, da implizit von einer größtmöglichen Übereinstimmung von Ziel- und Trainingsübung ausgegangen wird. Ist es in einem Fall die Übereinstimmung der Kinematik und Dynamik der makroskopischen Bewegungen (vgl. Datschkow, 1977; Werchoschanski, 1972), so sind es im anderen Fall die Übereinstimmungen der mikroskopischen Schwingungen (Mester et al., 2000), die auf einen positiven Trainingseffekt hoffen lassen. Eine grundlegende Schwierigkeit dieser Vorgehensweisen liegt in der von Heraklit formulierten Weisheit, wonach man niemals zweimal in den gleichen Fluss steigt. Für den motorischen Bereich wurde es von Bernstein (1967) mit „Wiederholen ohne zu wiederholen“ metaphorisch aufgegriffen. Auch im Skisport kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass keine identischen Bewegungswiederholungen auftreten. Ist jedoch selbst nach mehreren tausend Kilometern Bergabfahrten immer noch Neues bzw. Anderes im Bewegungsablauf zu erwarten, dann gerät das Konzept des Einschleifens von

Bewegungstechniken speziell bei den Randbedingungen des Skifahrens in große Schwierigkeiten. Wird im Unterschied dazu die Anpassung an die stetig neu auftretenden Situationen als ein grundlegendes Element des Skifahrens betrachtet, dann müsste im Sinne einer Übereinstimmung von Ziel- und Trainingsübungen auch diese Fähigkeit zur Anpassung als Gegenstand im Skitraining Berücksichtigung finden.

Zur Klärung der Frage, inwiefern detaillierte biomechanische Kenntnisse und das Wissen um die Problematik von Gruppenuntersuchungen zu anderen als den bislang bekannten praktischen Konsequenzen führen können, werden im Folgenden die biomechanischen Einflussgrößen beim alpinen Skifahren anhand eines Deduktionsstammbaums (Ballreich et al., 1996; Hay, 1993) dargestellt und diskutiert.

## 2. Biomechanischer Deduktionsstammbaum für das alpine Skifahren

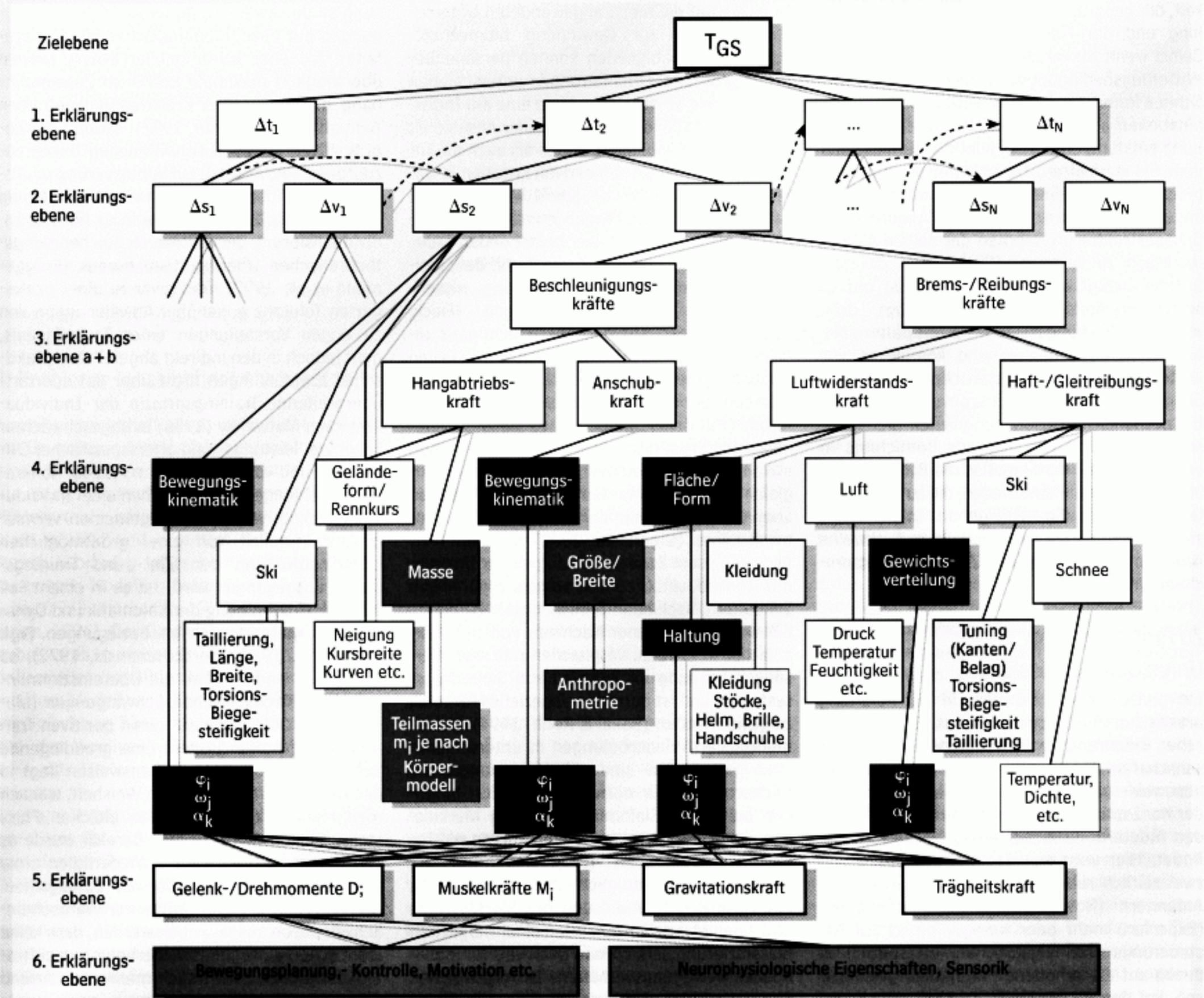
Relativ unabhängig von der Art des Materials oder der angewendeten Skifahrtechnik lassen sich im alpinen Skisport übergreifende Charakteristika oder physikalische Gesetzmäßigkeiten identifizieren, anhand derer Schlussfolgerungen auch für einen methodischen Ansatz im Skifahren gezogen werden können. Der entwickelte Deduktionsstammbaum stellt ein qualitatives Modell zur Darstellung der wechselseitigen Abhängigkeiten von Einfluss- und Zielgrößen dar und kann u. a. dazu dienen, ein quantitatives Modell des Skiabfahrtslaufs zu erstellen. Das Modell erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist im Folgenden in erster Linie als Hilfestellung zur selbstständigen Ableitung möglicher Variationsparameter beim differenziellen Lernen gedacht. Im Anschluss

werden zur Veranschaulichung exemplarisch mögliche Ableitungen für die Praxis des differenziellen Lernens beim alpinen Skifahren dargestellt.

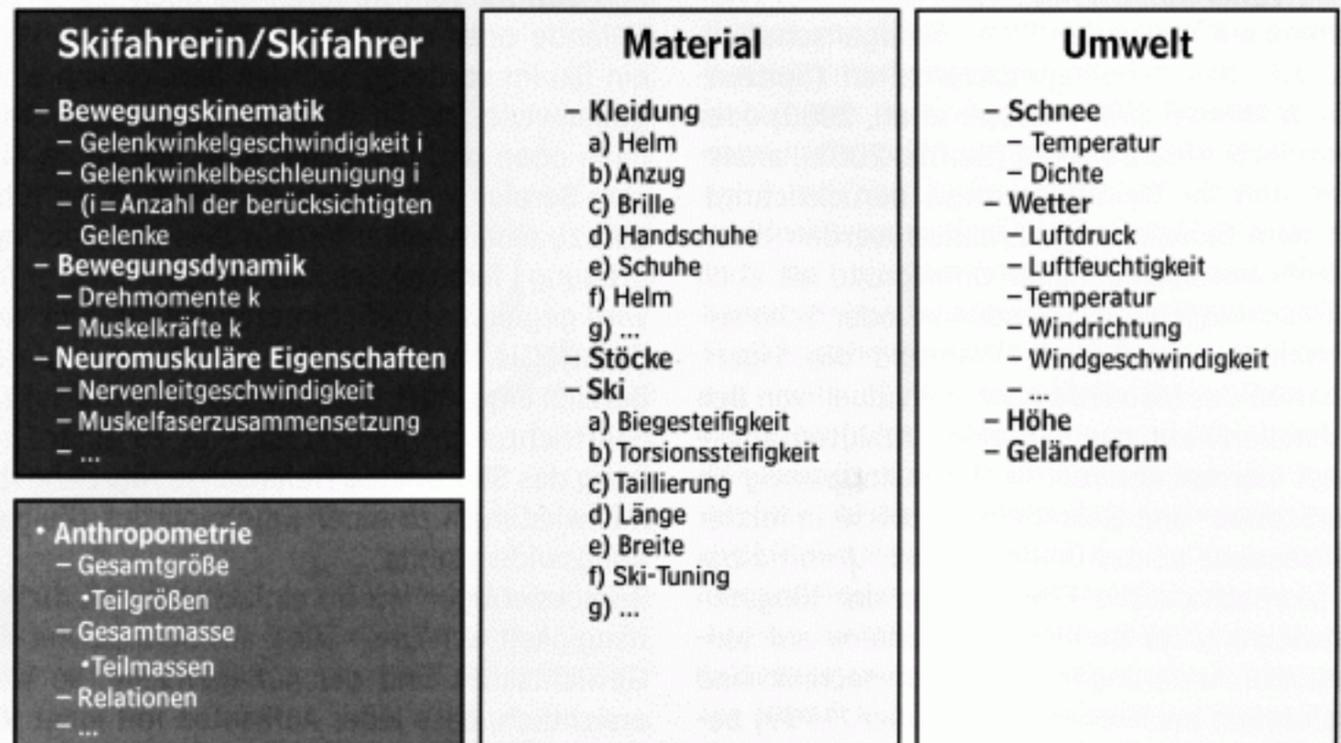
### Zielgröße Gesamtfahrzeit $T_{GS}$

Orientieren wir uns im alpinen Skisport am Leistungssport, so stellt im Allgemeinen das oberste Ziel bzw. die Zielgröße die Überwindung eines vorgegebenen Streckenbereichs  $GS$  in minimaler Zeit  $T_{GS}$  dar (Abb. 1). Diese Zielgröße  $T_{GS}$  lässt sich auf einer ersten Erklärungsebene differenzieren in Teilzeiten  $\Delta t_i$ , die für einzelne Streckenabschnitte  $i$  benötigt werden. Biomechanisch im Sinne eines Deduktionsstammbaums betrachtet, sind der zurückzulegende Weg  $\Delta s_i$  und die mittlere Fahrgeschwindigkeit  $\Delta v_i$  Einflussgrößen, die deterministisch die Fahrzeit  $\Delta t_i$  für die jeweiligen Teil-

ABB. 1 Deduktionsstammbaum für den alpinen Skilauf



Deduktionsstammbaum für den alpinen Skilauf (Erläuterungen vgl. Text)



Einflussgrößen zusammengefasst nach den Bereichen Skifahrerin/Skifahrer (blau), Material (hellblau) und Umwelt (hellgrau)

strecken bestimmen. Biomechanische Größen, die wiederum auf einer nächst detaillierten Erklärungsebene den zurückzulegenden Weg  $\Delta s_i$  und die Fahrgeschwindigkeit  $\Delta v_i$  des Skifahrers beeinflussen, sind in Abb. 1 aufgeführt und werden nachfolgend im Detail besprochen. Aufgrund der wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Teilabschnitte sind die Zuordnungen von Einfluss- und Zielgrößen nicht streng hierarchisch von oben nach unten angeordnet, sondern durch zusätzliche Abhängigkeiten mit gestrichelten Linien zusätzlich gekennzeichnet. So kann z.B. eine verkürzte Fahrstrecke in Teilabschnitt  $\Delta s_k$  zwar zu einer Verkürzung der Teilzeit  $\Delta t_k$  in diesem Abschnitt führen, gleichzeitig jedoch auch zu einer Verlängerung der Fahrstrecke  $\Delta s_{k+1}$  und damit zu einer Verlängerung der Teilzeit  $\Delta t_{k+1}$ . Eine solche Abhängigkeit besteht auch in Bezug auf die Teilgeschwindigkeiten  $\Delta v_k$ . So können bestimmte optimale Fahrlinien nur mit bestimmten optimalen Geschwindigkeiten gefahren werden.

### Einflussgrößen der mittleren Wegstrecken $\Delta s_i$

Die Einflussgrößen auf der vierten Erklärungsebene sind kategorial unterschieden in Einflussgrößen des Skifahrers (dunkelblau unterlegt), der Ausrüstung (hellblau unterlegt) und der Umwelt (hellgrau unterlegt) (vgl. Abb. 2). In Bezug auf die Wegstrecke  $\Delta s_i$  kommt sicher der Streckenwahl des Skifahrers und damit der Bewegungskinematik (dunkelblau), beschrieben durch Gelenkwinkel  $\varphi_j$ , Gelenkwinkelgeschwindigkeiten  $\omega_j$  und Gelenkwinkelbeschleunigungen  $\alpha_j$ , eine wesentliche Rolle zu. Aufgrund der Streckenverhältnisse (Geländeform) in derzeitigen Skirennen und den damit verbundenen Geschwindigkeiten könnte die Ebene der Einflussgröße Weg zusätzlich differenziert werden in Weg mit und Weg ohne Bodenkontakt. Der Weg mit Bodenkontakt, den ein Skifahrer zurücklegt, wird neben der ebenen Geometrie von Kurve zu Kurve maßgeblich durch das Geländeprofil beeinflusst, innerhalb dessen sich der Athlet den Weg zum Ziel sucht. Dabei stellt der kürzeste Weg nicht immer die Lösung dar, die auch zur geringsten Zeit im Ziel führt. Vielmehr gilt es, den zu wählenden Weg dem Geländeprofil so anzupassen, dass die potenzielle Energie optimal in kinetische Energie umgewandelt wird. Es wird hier von einem Optimaltrend ausgegangen, da ein Maximum an Geschwindigkeit in einem Streckenabschnitt zu einem Verlassen des Pistenabschnitts oder zu einem deutlich nachteiligen Streckenverlauf in einem der folgenden Streckenabschnitte führen kann.

Wege ohne Bodenkontakt (Flug) treten überwiegend an Krümmungen im Gelände auf, an denen der Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit des Skifahrers so gestaltet sind, dass er nicht mehr dem Skiuntergrund folgen kann. Ist die Länge der dabei entstehenden Flugparabel länger als der Weg am Boden, so gilt es, diesen Flugweg zu verkürzen, indem bereits vor der „Schanze“ bzw. Krümmung abgesprungen wird. Führt der Flug von einer Erhe-

bung auf die nächste, so stellt er im Allgemeinen nur eine geringe Verlängerung des Weges dar, die aufgrund der verringerten Gleitreibung vernachlässigbare Nachteile birgt. Neben diesen skiunabhängigen Einflussgrößen des Weges kommt mit den Carvingskiern der Geometrie (Form) des Skis in Bezug auf die Weggestaltung eine zunehmende Bedeutung zu. Stärkere Taillierungen der Skier erlauben mittlerweile durch verkleinerte Radien engere Kurven um die Streckenmarkierungen oder Slalomstangen und damit ebenfalls Wegverkürzungen.

### Einflussgrößen der mittleren Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_i$

Analog den Einflussgrößen der Wegstrecke  $\Delta s_i$  sind die Einflussgrößen der Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v_i$  auf der vierten Ebene nach den Kategorien Skifahrer (dunkelblau) Material (hellblau) und Umwelt (hellgrau) unterteilt. Die eingefügten Erklärungsebenen 3a und b sind didaktischer Art. Dementsprechend sind die Einflussgrößen der mittleren Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v_i$  neben der Starttechnik aus dem Starthaus und dem Anschub während der ersten Meter (Anschubkraft der Arme und Beine) vor allem die Masse (Hangabtriebskraft) des Athleten mit seiner gesamten Ausrüstung sowie zwei Formen des Reibungswiderstandes, der Gleit- und der Luftwiderstand.

Während die Masse des Gesamtsystems Skifahrer kurzfristig nur durch das Gewicht der Kleidung und Ausrüstung beeinflussbar ist, werden die Reibungswiderstände im hohen Maße durch Materialeigenschaften und Verhalten des Skifahrers während der Fahrt beeinflusst. Die Materialeigenschaften beziehen sich dabei u. a. auf die Aerodynamik des Helms und der Kleidung in Wechselwirkung mit den unterschiedlichen Eigenschaften der Luft wie Luft-

feuchtigkeit, Temperatur, Windrichtung etc. in Bezug auf die Luftreibung, die Skioberfläche bzw. den Skibelag, die Schwingungseigenschaften, die Torsions- und Biegesteifigkeit des Skis sowie die Schneekonsistenz bezüglich der Gleitreibung. Sowohl die Luft- als auch die Gleitreibung können durch die Aktionen der Skifahrerin bzw. des Skifahrers grundlegend verändert werden. Wird durch die Körperhaltung primär der Luftwiderstand beeinflusst, führen Gewichtsverlagerungen, Aufkanten, laterale Verschiebungen (Wechsel zwischen parallel geschlossener und offener Skistellung) und Rotationen (Winkelstellungen: Pflug- oder Scherstellung) der Skier zur Änderung der Gleitreibung.

### Einflussgrößen der Weg- und Geschwindigkeitsmerkmale

Gruppieren wir wiederum die Einflussgrößen der Weg- und Geschwindigkeitsmerkmale in Bereiche der Umgebung (z. B. Rennstrecke), der Ausrüstung und des Skifahrers, so war lange Zeit eine Zuordnung dieser Bereiche zu speziellen Forschungs-/Tätigkeitsbereichen zu beobachten. Für die Ausrüstung war die materielle Industrieforschung zuständig, für die Umgebung die Rennorganisation, und dem Bereich der Skifahrer waren Trainer und Bewegungswissenschaftler zugeordnet.

Mit zunehmender Leistungssteigerung war und ist jedoch eine immer enger werdende Kooperation aller drei Bereiche festzustellen, ohne dass sich dabei die jeweiligen Schwerpunkte völlig auflösen. Für den Bereich der Bewegungs- und Trainingswissenschaft sind daher weiterhin in erster Linie Einflussgrößen der Bewegungskinematik, der Bewegungsdynamik und des neuromuskulären Systems von Interesse. In Bezug auf eine systemisch-ökologische (Material und Umwelt) Betrachtung des Skifahrens, bei der sowohl der Athlet als auch

die Wechselwirkung mit dem Material und der Umgebung Gegenstand sind, werden mittlerweile zunehmend Fragen des Adaptationsverhaltens auf unterschiedliche Skieigenschaften, wie z.B. das Schwingungsverhalten (Spitzenpfeil & Mester, 1997; Mester et al., 2000) oder optimierte Abfahrtswege (Seifriz, 2001), analysiert und im Trainingsprozess berücksichtigt. Mit dem Schwingungsverhalten werden dabei sowohl unterschiedlicher Untergrund als auch unterschiedliche Ski-, Bindungs- oder Schuhereigenschaften analysiert. Während die Eigenschaften des Materials noch individuell von den Herstellern auf den einzelnen Athleten angepasst werden können, liegt die Anpassung an die Schnee- und Geländebedingungen in letzter Konsequenz beim Athleten selbst. Unmittelbare biomechanische Folgerungen der jüngsten Entwicklung im Bereich des Carvens auf tendenzielle Änderungen der Skifahrtechnik sind ausführlich bei Niessen und Müller (1999) beschrieben.

Im Wesentlichen führt dies zu folgenden Änderungen in der Skifahrtechnik:

- Kurven mit kleineren Radien,
- höhere Geschwindigkeiten der Athleten,
- mehr Seitwärtslage der Athleten in Kurven und
- stärkere Längsbiegung des Skis.

Das auf den ersten Blick überwiegend vorteilhafte neue Skidesign mit stärkerer Taillierung birgt bei detaillierter Betrachtung Probleme, die eine unmittelbare Wechselwirkung zur Fahrgeschwindigkeit und damit veränderte Ansprüche an das Fahrverhalten mit sich bringen. Für eine ausführliche Erörterung dieser Veränderungen siehe Niessen und Müller (1999).

## **Einflussgrößen Bewegungskinetik und Bewegungsdynamik**

Gehen wir im Idealfall bei geradlinigem Fahren mit paralleler Skistellung und strömungsgünstiger Abfahrts Haltung von dem geringsten Geschwindigkeitsverlust durch Luft- und Gleitreibung aus, so führt jede Abweichung von diesen Bedingungen zu einem Anstieg der Reibungskräfte und damit zu einem Geschwindigkeitsverlust. Änderungen dieser Bedingungen können zum einen von außen verursacht sein, z.B. durch Wind, Gelände oder Schnee, zum anderen durch den Athleten selbst, z.B. bei Gewichtsverlagerung, Aufkanten, Haltungsänderung oder Skituning (Wachs, Belageigenschaften etc.). Alle drei Bedingungsbereiche stehen hier in starker Wechselwirkung. So ist eine Änderung (von außen) durch das Gelände stets mit einer Haltungsänderung verbunden, um die Luftreibung so gering wie möglich zu halten, ebenso wie der Wind eine Haltungsänderung bewirken kann und umgekehrt eine durch den Athleten selbst ausgelöste Gewichtsverlagerung zu unterschiedlich starkem Einsinken in den Schnee und damit zu unterschiedlich tiefen Spuren im Schnee bzw. zu veränderten Schneebedingungen führen kann (Schnee ändert seine physikalischen Eigenschaften, wenn er unter Druck komprimiert wird).

Auch Änderungen der Skistellung (Winkel oder seitlich versetzt) oder Aufkanten des Skis können sowohl vom Athleten als auch durch das Gelände oder den Schnee bedingt sein. Wird ein Ski im vorderen äußeren Bereich von einer Bodenwelle (durch Gelände oder Eisbrocken) nach oben gedrückt bzw. sinkt der Ski in diesem Bereich weniger ein als der Rest, so führt dies zu einem Aufkanten des Skis mit einer Verdrehung (Torsion) des Skis in sich (vorderer Teil wird gegenüber dem hinteren Teil des Skis verdreht). Gleichzeitig erfährt der Ski im vorderen Bereich eine Kraft, die senkrecht (seitwärts) zur Fahrtrichtung orientiert ist, was zu einer Drehung des Skis um die Tiefenachse führt und damit wiederum zu einer Erhöhung des Gleitreibungswiderstands.

Berücksichtigen wir im einfachsten Fall die Abhängigkeit der Einsinktiefe im Schnee von der Gewichtskraft und der Auflagefläche, so wird ersichtlich, dass jedes Aufkanten mit einer Reduktion der Auflagefläche und demzufolge mit einer größeren Einsinktiefe und hier in der Folge mit einer Erhöhung des Gleitwiderstands verbunden ist. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass die im Rahmen einer Abfahrt zu gewinnende kinetische Energie und damit die maximal zu erzielende Abfahrtgeschwindigkeit im höchsten Maße von dem Gewicht eines Athleten abhängt. D. h., eine geringere Einsinktiefe im Schnee durch Gewichtsabnahme zu erzielen, wäre kontraproduktiv.

Sowohl dem Anheben des vorderen Skibereichs als auch dem Verdrehen des Skis in sich wirken Biege- und Torsionseigenschaften des Skis in einem gewissen Ausmaß entgegen und kompensieren die dabei häufig auftretenden Schwingungen im Ski graduell; in letzter Konsequenz werden jedoch sämtliche äußeren Einflüsse über Ski, Bindung und Schuh auf die Beine und den Körper des Skifahrers übertragen, der durch eine entsprechende Bewegungskontrolle adäquat zu reagieren hat, um sich den oben genannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Luft- und Gleitreibungswiderstands unterzuordnen. (Auf die Problematik des Entstehens eines Wasserfilms durch entsprechenden Druck wird hier aus didaktischen Gründen verzichtet bzw. auf Buhl, Bruderer, Fauve & Rhyner [2001] verwiesen.)

Da Skipisten im Allgemeinen nicht nur gerade, hangabwärtsgerichtete Streckenabschnitte enthalten und auch in den seltensten Fällen Windstille oder unterstützender Rückenwind vorherrschen, sind die beschriebenen Änderungen unumgänglich und prinzipiell mit einer ständigen Änderung des Gleit- oder Luftwiderstandes verbunden. Der erfolgreichere Skifahrer wird sich jedoch vom weniger erfolgreichen primär darin unterscheiden, dass er die Erhöhungen der Reibungskräfte in der Summe so gering wie möglich hält und optimal gleitet.

Noch komplexer wird die Wechselwirkung im Falle einer gezielten Richtungsänderung. Fährt ein Skifahrer eine Kurve, dann versucht er aus Gründen der Gleichgewichtserhaltung und Stabilität der Körperposition mit beiden Skiern Bodenkontakt zu halten. Durch den Kontakt mit

beiden Skiern wird die Unterstütsungsfläche vergrößert und eventuelle Störungen werden leichter kompensiert. Ferner kommt es durch die Verlagerung des Gewichts auf ein Bein zu einer größeren Einsinktiefe im Schnee und damit zu einer Erhöhung des Gleitwiderstands. Findet die Kurvenfahrt jedoch auf Eis statt, so kann dort eine notwendige Eindringtiefe zum Erreichen der optimalen Kantengriffkräfte eventuell nur durch einbeinigen Kontakt erzielt werden. Im Allgemeinen werden jedoch beim gleitenden, schneidenden (gecarvten) Fahren der Kurve die Skier aufgekantet, wodurch die Taillierung und die Biegung der Skier – die durch das Körpergewicht, die Muskelkraft und die Trägheitskraft des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird – den Radius der zu fahrenden Kurve bestimmen. Problematisch hierbei ist, dass beide Skier je nach Taillierung und Biegung ihre eigenen Radien aufweisen und entsprechend eigenen Bahnkurven folgen (vgl. Niessen & Müller, 1999). Sind die Radien auf der jeweiligen Skiinnenseite und der anderen Skiaußenseite gleich groß, oder sind beide Skier in der Kurve nach vorne bzw. hinten versetzt, so kommt es bei virtueller Fortführung der Bahnkurven zu deren Überschneidung, real jedoch schon zu Beginn der Kurve zu einem stärkeren Bremsverhalten durch einen der beiden Skier. Da die Überschneidung der Bahnkurven von linkem und rechtem Ski zu einem Überkreuzen der Skier führen würde (Abb. 3) und mit einem sicheren Sturz verbunden wäre, wird die Bahnkurve durch den Skifahrer vorab mit feinkoordinierten neuromuskulären Aktivitäten gesteuert, was wiederum mit einem Driften oder einer Querbewegung und damit mit einem Geschwindigkeitsverlust verbunden ist.

Der Moment der Situationskontrolle wird für den Skifahrer noch weiter erschwert durch die Beeinflussung der Skibiegung durch die Härte des Untergrunds. Allein das Aufkanten der Skier im Stehen verringert die Fläche des Skis auf dem Schnee und vergrößert damit die Kraft pro Fläche, was wiederum mit einem tieferen Einsinken im Schnee verbunden ist. Das Einsinken der Ski in den Schnee wird zusätzlich verstärkt durch die in einer Kurve wirkenden Zentrifugalkräfte und ein mögliches Strecken der Knie mit der Absicht zum Abdruck für einen anschließenden Sprung oder eine (Hoch-)Entlastung.

Gehen wir von einer während der Abfahrt öfter variierenden Spurbreite aus, so ist mit einer ständig variierenden Gewichtsverteilung auf beiden Skiern und demzufolge mit ständig veränderten Einsinktiefen im Schnee und somit fortlaufend mit veränderten Bedingungen beim Fahren von Kurven auszugehen. In jedem Fall bewirkt ein tieferes Einsinken im Schnee eine Erhöhung des Gleitwiderstands und damit eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit. Diese Reduktion gilt es abzuwägen gegen eine durch die verstärkte Biegung des Skis verursachte engere Kurvenbahn und dadurch eventuell gegen einen Zeitgewinn durch einen verkürzten Fahrweg. Ziehen wir zusätzlich zur Taillierung und dem Grad der Biegung des Skis auch die Gewichtsverlagerung nach vorne und hinten in Betracht,

so erhöht sich die Zahl der „Stör“- oder Einflussvariablen um ein Vielfaches. Wird der Ski eher im vorderen Bereich belastet, verringert sich der Kurvenradius aufgrund des längeren Hebels stärker als bei einer gesteigerten Belastung des hinteren Skiteils. Gehen wir in diesem Zusammenhang von mikroskopisch ständig veränderten Gleit- und Luftreibungskräften, deren Wirkung mit zunehmender Geschwindigkeit steigt, aus, dann erhöht sich die Anzahl der zu kontrollierenden Freiheitsgrade weiter. Führt der Ski während einer Abfahrt auf einen Untergrund mit erhöhter Gleitreibung, wird der Ski relativ zum Athleten abgebremst, der Athlet bewegt sich aufgrund seiner Trägheit weiter, was in der Summe einer Gewichtsverlagerung nach vorne entspricht. Analoges ist festzustellen, wenn der Athlet durch eine veränderte Oberkörperhaltung oder entsprechenden Gegenwind die Luftreibung erhöht, dadurch gegenüber den Skiern abgebremst wird und eine Gewichtsverlagerung nach hinten stattfindet. Gleiches ist analog beim An- und Abfahren eines Hügels zu beobachten. Mikroskopisch ist eine Änderung der Reibungseigenschaft auch durch Schwingungen im Ski auszulösen, wenn unterschiedlich viele Kontaktstellen zum Untergrund rhythmisch wechseln.

Insgesamt ist der geringste Geschwindigkeitsverlust bei plan aufliegenden, ausschließlich in Fahrtrichtung orientierten Skiern zu erwarten. Jede Dreh- oder Aufkantbewegung eines Skis führt zu einer Geschwindigkeitsreduktion, die sich durch das Fahren von Kurven zwar nicht vermeiden, durch eine rasche und adäquate Kontrolle der Skier jedoch auf ein Minimum reduzieren lässt. Die gleiche Fähigkeit wird auch bei Gleitabschnitten notwendig, wenn man berücksichtigt, dass weder das Gelände noch die Piste vollkommen eben sind. Wird durch eine Unebenheit oder unterschiedliche Einsinktiefen ein Ski gedreht oder aufgekantet, so korrigieren oder kompensieren zwar die Torsions- und Biegeeigenschaften des Skis in einem gewissen Maß diese Störung, am Ende muss der Athlet jedoch auch auf die gedämpfte Störung in kürzester Zeit adäquat reagieren können.

### 3. Folgerungen

Alles in allem liefern klassische biomechanische Modelle für das alpine Skifahren, die im Allgemeinen auf Ausschnitten des obigen Deduktionsstammbaums basieren, lediglich einen groben Rahmen, innerhalb dessen sich immer noch ein hochdimensionaler Lösungsraum für den Skifahrer eröffnet. Selbst wenn wir davon

## ABB. 3 Bahnkurven



ausgehen, dass ungünstige Kombinationen von Kräften während einer Abfahrt immer wieder dazu führen, dass der Athlet aus dem optimalen Lösungsraum geworfen wird, so gilt es, unabhängig von dem biomechanisch vorgegebenen optimalen Lösungsraum den Athleten dazu zu befähigen, sich selbst wieder in den Bereich optimaler Lösungen zu bringen. Auch hier scheint die Wahrscheinlichkeit identischer Störungen oder identischer Wege in Richtung des optimalen Lösungsraums verschwindend gering zu sein. In Verbindung mit der geringen Wahrscheinlichkeit identischer Bewegungsausführungen selbst innerhalb des optimalen Lösungsraums scheint es im Sinne einer Ökonomisierung des Trainings- oder Lernprozesses plausibel, sich hier eher eine generelle Adaptionsfähigkeit anzueignen, als ausgewählte Techniken tausende Male wiederholen zu lassen in der Hoffnung, dass sämtliche mögliche Situationen einmal abgedeckt sein werden. Von zentraler Bedeutung ist hier also ein Interesse an der Adaptionsfähigkeit auf verschiedenen Zeitskalen und weniger das spezifische Erlernen ausgewählter Idealtechniken.

Aus biomechanischer Sicht muss der Skifahrer unabhängig von Alter, Geschlecht oder Leistungsniveau während einer Abfahrt fähig sein, mit seinen individuellen anthropometrischen und neuromuskulären Bedingungen situativ in kürzester Zeit so zu reagieren, dass die Bremskräfte bei optimalem Weg minimal werden. Gehen wir davon aus, dass die Skifahrer in der Mehrzahl ihrem Niveau entsprechend schnell abfahren, der Fortgeschrittene also mit einer größeren Vielzahl an Möglichkeiten in kürzerer Zeit konfrontiert wird und dem Anfänger mehr

Zeit zur Auswahl aus einem geringeren Pool an Möglichkeiten zur Verfügung steht, ist in beiden Fällen aufgrund eines ähnlichen Informationsflusses von ähnlichen Mechanismen zur Bewegungskontrolle auszugehen.

Neben den eher theoretischen Problemen mit dem mehr oder weniger differenzierten Umgang mit den Bedingungen deterministischer und indeterministischer Gesetzmäßigkeiten liefert der biomechanische Deduktionsstammbaum zahlreiche Hinweise über eine mögliche Einflussnahme seitens des Athleten im Hinblick auf eine Leistungsoptimierung. Jede Erklärungsebene bietet Trainer und Athlet mit einer spezifischen und differenzierten Terminologie bzw. variabler Sprach- und Instruktionwahl die Möglichkeit, individuell auf die Kommunikationsbedingungen der Athleten einzugehen.

Analog bietet der Deduktionsstammbaum Hilfestellungen und Anregungen für Variationen im Hinblick auf die spezifische Verbesserung der Adaptionsfähigkeit im Sinne des differenziellen Lernansatzes. Sowohl die Individualität von Skitechniken (Schöllhorn et al., 2001) als auch die geringe Wahrscheinlichkeit identischer Bewegungswiederholungen (Bernstein, 1967; Hatze, 1986; Schöllhorn, 1998) deuten auf eine hohe Anzahl an Lösungsmöglichkeiten hin, die in Bezug auf die Athleten durch beliebig viele Kombinationen der kinematischen und dynamischen Merkmale realisiert werden. Im zweiten Teil dieses Beitrags werden in der nächsten „Leistungssport“-Ausgabe trainingspraktische Konsequenzen abgeleitet.

\*

Die Literaturliste ist auf [www.leistungssport.net](http://www.leistungssport.net) als PDF-Download abrufbar.

\*

### Die Autoren

Prof. Dr. Wolfgang I. SCHÖLLHORN ist Lehrstuhlinhaber für Trainings- und Bewegungswissenschaft an der Universität Münster. Nach Studium der Physik und Diplom Sport in Mainz, Promotion in Biomechanik (Frankfurt) und Habilitation in Training- und Bewegungswiss. (DSHS Köln). Ehem. Handballer, Zehnkämpfer, Vizeeuropameister und Deutscher Meister im Bobsport, ehem. Trainer mehrerer Deutscher Jugendmeister in der Leichtathletik. Seit 20 Jahren biomechanische und trainingswissenschaftliche Beratung von Nationalmannschaftsmitgliedern u. a. in der Leichtathletik, Karate, Basketball, Golf, Volleyball.

Peter HURTH, Diplom Sportlehrer, wiss. Mitarbeiter am Institut für Sportwissenschaften der Universität Frankfurt. Skilehrer und zuständig für Schneesportausbildung.

Thorsten KORTMANN, freier Mitarbeiter am Institut für Sportwissenschaft der Universität Münster. A-Trainer Rudern, Trainer mehrerer Deutscher Jugendmeister im Rudern. Anschrift der Autoren: Westfälische Wilhelms-Universität, Abt. Trainings- und Bewegungswissenschaft, Prof. Dr. Wolfgang Schöllhorn, Leonardo Campus 15, 48149 Münster E-Mail: [move.brain@uni-muenster.de](mailto:move.brain@uni-muenster.de)