

# Die Mechanik des alpinen Skilaufs

Autor(en): **Schultes, Hermann**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jugend und Sport : Fachzeitschrift für Leibesübungen der Eidgenössischen Turn- und Sportschule Magglingen**

Band (Jahr): **35 (1978)**

Heft 10

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-993996>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



## Die Mechanik des alpinen Skilaufs

Hermann Schultes

nicht gar unmöglich ist. Zu diesen variablen Grössen zählt vor allem der Mensch und sein schwierig zu bestimmender Beitrag zu den Gesetzmässigkeiten des Bewegungsablaufes beim Skilauf. Eine weitere variable Grösse ist sicher auch das Gerät, hier vor allem der Ski, aber auch in nicht unwesentlicher Masse der Skistiefel. Die weitaus am stärksten variierenden Grössen sind jedoch die Umgebungsbedingungen, vor allem der Pistenzustand und hier insbesondere die stark variierende Beschaffenheit von Schnee und Eis.

Für den Skikonstrukteur ist es unumgänglich notwendig, diese Grössen und ihre Variationsbreite zu kennen, denn sie beeinflussen in ihrer Gesamtheit seine Entscheidungen. Der Skihersteller verfolgt mit wachem Interesse die Entwicklung des internationalen Skilehrwesens, bedeutet doch dessen Wirken eine gewisse Vereinheitlichung der grundsätzlichen Bewegungsabläufe und damit eine bessere Erfassbarkeit der variablen Grösse «Skifahrer». Die Technik des alpinen Skilaufs ist ständigen Neuerungen und Anpassungen unterworfen und erfordert daher, insbesondere von seiten der Ski-Industrie, intensive Beobachtung und schnelle Reaktion auf Entwicklungstendenzen. Modische Trends, wie zum Beispiel die vor einigen Jahren stark forcierte «Jet-Technik» oder echte Neuerungen, wie zum Beispiel die Entwicklung des Freistil-Skilaufs, erfordern von der Ski-Industrie entscheidende Massnahmen in Form von Anpassung des Gerätes an diese neuen Techniken. Damit diese Massnahmen von seiten der Industrie auch Erfolg bringen, ist es für den Konstrukteur von Ski, Bindung oder Skistiefel unbedingt erforderlich, die mechanischen Gesetzmässigkeiten beim alpinen Skilauf und insbesondere bei neuen Techniken zu kennen und logisch in seinen konstruktiven Massnahmen zu verarbeiten. Das gleiche, das hier über den Skifahrer und seine Technik gesagt wurde, gilt auch für die Umgebungsbedingungen, für den Pistenzustand. Da die Gesetzmässigkeit des Bewegungsablaufes von der Beschaffenheit von Schnee oder Eis wesentlich beeinflusst wird, ist diese variable Grösse in besonderem Masse bei der Entwicklung oder Bewertung von Skimodellen zu berücksichtigen. Es ist für die Gestaltung der Fahreigenschaften eines Skimodells sicher nicht gleichgültig, ob es für die berühmtesten Eispisten New Englands oder für die traumhaften Pulverschneehänge der Rocky Mountains bestimmt ist. Unterschiede der Pistenbeschaffenheit im alpinen Hochgebirge gegenüber derjenigen im tiefergelegenen Mittelgebirge spielen genauso eine Rolle wie die Unterschiede zwischen natürlichem und mit Schneemaschinen hergestelltem künstlichem Schnee.

Da der Schnee als «Reibungspartner» des bewegten Ski einen eminenten Einfluss auf das Kräfte- und Momentensystem hat, das zur Steuerung des Massensystems Skiläufer + Ski wirksam wird, ist dieser Hinweis auf die breite Streuung dieser variablen Grösse für das Verständnis der folgenden Betrachtungen über die Mechanik beim Skilauf sicher sehr wichtig. Die Mechanik des alpinen Skilaufs lässt sich als eine kontrollierte Steuerung eines ungleichförmig beschleunigten Massensystem definieren. Die zur Steuerung des Systems Skiläufer + Ski erforderlichen Kräfte oder Momente werden durch wechselnde Reibungswiderstände an der Lauffläche des Ski, sowie durch Schwerpunktverlagerung des Skiläufers in Richtung aller Raumachsen, im Sinne der gewünschten Bewegung oder Richtungsänderung beeinflusst (1).

Wie jedes andere System folgt dabei das System Skiläufer + Ski ausschliesslich den Gesetzen der Physik und ist daher, wenn auch mit einiger Einschränkung, nach physikalischen Gesetzen analysierbar. Im wesentlichen sind es Kräfte und Momente, die den Bewegungsablauf beim alpinen Skilauf bestimmen. Die Schwerkraft bewegt den Körper des Skiläufers in Richtung der Falllinie. Die Geschwindigkeit und die Richtung werden kontrolliert durch gezielte Veränderung des Reibungswiderstandes zwischen Ski und Pistenoberfläche. Dieser Reibungswiderstand setzt sich zusammen aus mehreren Faktoren, vornehmlich aus dem Schneeabräumwiderstand, dem Schneekompressionswiderstand und der Gleitreibung der Ski-Lauffläche. Da diese Widerstandswerte stark variieren und vor allem in Längs- und Querrichtung des Ski stark unterschiedlich sind, können die, für die Drehung des Ski erforderlichen Änderungen der Reaktionsmomente leicht kontrolliert werden. Zur besseren Veranschaulichung dieses in Wirklichkeit relativ komplizierten Vorganges (bedingt durch die stets wechselnde Situation), sollen die vereinfachten Schaubilder Abb. 1, 2 und 3 auf der nächsten Seite dienen. Dort werden folgende Begriffe verwendet:

- S = Massenschwerpunkt des Systems Skiläufer + Ausrüstung
- G = Gewicht des Systems Skiläufer + Ausrüstung
- $F_z$  = Zentrifugalkraft
- $F_o$  = Resultierende Kraft
- $F_{o'}$  = Resultierende Reaktionskraft
- $F_a$  = Schubkraft in der Drehebene
- $F_{a'}$  = Resultierende Kraftkomponente in der Drehebene a, gebildet aus der Summe aller  $F_R$
- $F_N$  = Normalkraft, wirkt normal zur Drehebene a

### 1. Allgemeines

Wesentlichste Voraussetzung für die richtige Beurteilung aller an einem Ski messbaren Grössen und deren Korrelation zu seinen Fahreigenschaften ist ein gewisses Verständnis für die Mechanik des alpinen Skilaufs. Allerdings sind die Bewegungsabläufe beim Skilauf ausserordentlich kompliziert und in ihrer Gesamtheit bis heute kaum bis ins kleinste Detail analysiert. Alpiner Skilauf wird auch heute noch im Wesentlichen intuitiv ausgeübt, obwohl insbesondere auf dem Gebiet des Skilehrwesens viele Bewegungsabläufe systematisch erforscht und formuliert wurden.

Die grösste Schwierigkeit bei der Analyse der Gesetzmässigkeiten innerhalb des auf der Piste bewegten Massensystems Skiläufer + Ski ist die grosse Anzahl von variablen Grössen, deren exakte Ermittlung äusserst schwierig, wenn

Abb. 1

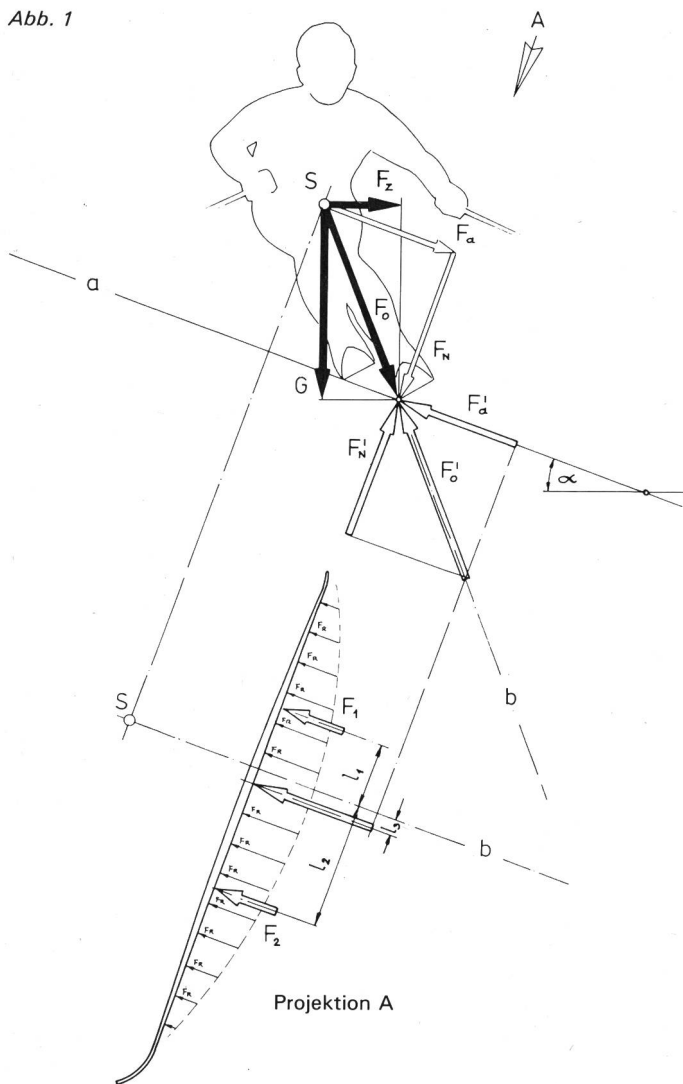
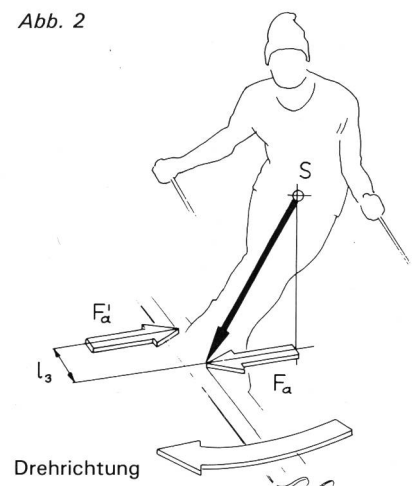


Abbildung 1:  
Das System der Kräfte  
und Momente während  
eines Schwunges.

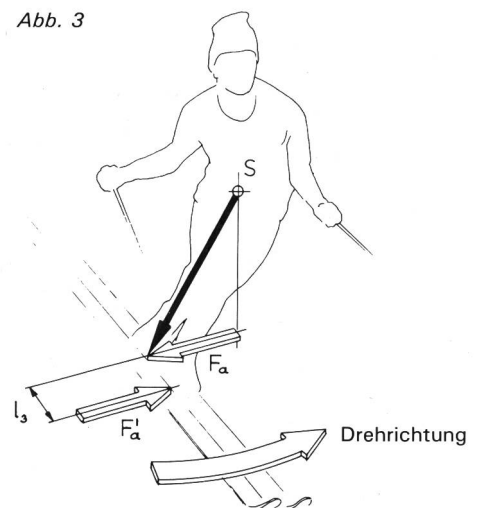
Abb. 2



Drehrichtung

Abbildungen 2 und 3:  
Die Momente zur Steuerung  
von Drehbewegungen.

Abb. 3



Drehrichtung

- $F_{N'}$  = Normal-Reaktionskraft
- $F_R$  = Reaktionskräfte in der Drehebene a
- $F_1$  = Resultierende Reaktionskraft aus der Summe aller  $F_R$  hinter der Wirklichkeitslinie b
- $F_2$  = Resultierende Reaktionskraft aus der Summe aller  $F_R$  vor der Wirkungsline b
- b = Wirkungsline von  $F_o$
- a = Drehebene
- $\alpha$  = Hangneigungswinkel
- $l_1$  = Abstand  $F_1$  von b
- $l_2$  = Abstand  $F_2$  von b
- $l_3$  = Abstand  $F_{a'}$  von b

## 2. Das Kräfte- und Momentensystem während der Drehung

Betrachten wir zunächst die Kräfte und Momente, die während der Aussteuerung einer Drehung wirksam werden. Das Kräftespiel in dieser Periode des Schwunges ist einfacher zu verstehen als die Gesetzmässigkeit bei der Einleitung der Drehung, die im Anschluss daran erklärt werden wird.

Ein sich in Bewegung befindlicher Skiläufer überträgt verschiedene Kräfte auf den Ski. Es

sind dies vor allem sein Gewicht, Zentrifugalkräfte, sowie aus vertikalen Körperbewegungen entstehende Kraftkomponenten. Die resultierende Kraft aus diesen einzelnen Komponenten kann man sich etwa im Schuhsohlenbereich angreifend denken. Die Wirkungslinie der resultierenden Kraft  $F_o$  geht immer durch die belastete Kante (oder Fläche) des Ski, ihre Lokalisierung in Längsrichtung ist jedoch variabel. Die Verschiebung der Wirkungslinie b in Längsrichtung (durch Verlagerung des Schwerpunktes S) ist eines der wesentlichsten Mittel zur Kontrolle und Aussteuerung von Drehbewegungen.

Jeder Kraft wirkt bekanntlich eine Reaktionskraft entgegen. Dies trifft auch für das System Skiläufer + Ski zu, in welchem der Kraft  $F_o$  eine auf die Lauffläche des Ski wirkende Reaktionskraft  $F_o$  entgegenwirkt. Die resultierende Reaktionskraft  $F_o$  kann man in zwei Kraftkomponenten  $F_{N'}$  und  $F_{a'}$  zerlegen.  $F_{a'}$  kann man sich auch als eine Summe von Einzelkräften denken, die, nach einer bestimmten Kurve variiert, über die Länge der Lauffläche verteilt, wirken. Die Form dieser Kurve wird durch die Steifheitsverteilung (Biegecharakteristik) des Ski bestimmt. Zwischen der mittleren Steifheit bzw. der Steifheitsverteilung des Ski und seinem Drehverhalten besteht daher ein enger Zusammenhang. (Siehe Kapitel: Die elastischen Eigenschaften von alpinen Ski und deren Einfluss auf das Fahrverhalten.)

Die entlang der Lauffläche (oder Stahlkante) wirkenden Reaktionskräfte  $F_R$  kann man auch zu resultierenden Reaktionskräften zusammenfassen. In Abb. 1 wurden die hinter der Wirkungslinie  $b$  angreifenden Reaktionskräfte zu einer resultierenden Reaktionskraft  $F_1$  und die vor der Wirkungslinie  $b$  angreifenden Reaktionskräfte zu einer resultierenden Reaktionskraft  $F_2$  zusammengefasst.

Nach den Gesetzen der Mechanik ergeben sich aus der hier dargestellten Situation die folgenden Schlüsse:

- Wenn das Moment  $F_2 \cdot 1_2$  grösser ist als das Moment  $F_1 \cdot 1_1$ , dann dreht der Ski mit der Spitze zum Hang. In Abb. 1 im Uhrzeigersinn.
- Wenn das Moment  $F_1 \cdot 1_1$  grösser ist als das Moment  $F_2 \cdot 1_2$ , dann dreht der Ski mit der Spitze zum Tal. In Abb. 1 entgegen dem Uhrzeigersinn.
- Wenn beide Momente gleich gross sind ( $F_1 \cdot 1_1 = F_2 \cdot 1_2$ ), dann kommt es zu keiner Drehung, die Bewegung ist geradlinig, wobei jede Variante von Schrägfahrt über Schrägrutschen bis Seitrrutschen möglich ist.
- Wenn  $F_a'$  kleiner ist als  $F_a$ , dann kommt es zu einer seitlichen Bewegung des Ski. Je grösser die Differenz zwischen  $F_a'$  und  $F_a$ , um so grösser ist der Anteil der seitlichen Bewegung. Diese Situation tritt auf beim Seitrrutschen und bei Schwüngen mit betonter Rutschphase.
- Wenn  $F_a'$  gleich oder annähernd gleich wie  $F_a$  dann ist die seitliche Bewegung sehr gering. Diese Situation tritt auf bei geschnittenen Schwüngen.

In Abb. 2 und Abb. 3 ist das zur Steuerung des Ski während der Drehung erforderliche Drehmoment noch einmal in vereinfachter Form dargestellt. Man kann sich nämlich  $F_1 + F_2$  als eine einzige resultierende Reaktionskraft  $F_a$  denken,

die an einem Punkt der Lauffläche (oder Stahlkante) angreift. Dieser Angriffspunkt kann in der Wirkungslinie  $b$  liegen, dann kommt es zu keinem Drehmoment und daher auch zu keiner Drehung. Das System ist mechanisch «indifferent».

Greift  $F_a'$  jedoch vor oder hinter der Wirkungslinie  $b$  an, dann entsteht ein Drehmoment  $F_a' \cdot 1_3$ , das den Ski entweder bergwärts oder talwärts dreht. Das System ist mechanisch «instabil» geworden.

Auf diese Weise dargestellt, scheint das, zur Steuerung einer Drehung wirkende Momentensystem relativ einfach zu sein. In der Praxis ist es jedoch wegen der weiten Streuung von variablen Einflussgrössen wesentlich komplizierter. Abschliessend sollen daher diese Einflussgrössen und ihr Beitrag zur Drehung noch einmal zusammengefasst werden.

Eine Drehung wird angesteuert durch Kontrolle der um die Wirkungslinie  $b$  wirkenden Momente. Diese werden variiert, entweder durch Veränderung der Kräfte oder durch Veränderung der Kraftabstände.

- Veränderung der Grösse der Kräfte:

Die Grösse der resultierenden Kräfte  $F_o$  kann vom Skiläufer durch Belastungs- oder Entlastungsbewegungen kontrolliert werden. Die Grösse der Reaktionskräfte ist abhängig vom Abräumwiderstand des Schnee, wird jedoch vom Skiläufer kontrolliert durch Variation des Kantenwinkels des Ski. Da es sich bei den Reaktionskräften um Anströmkräfte handelt, die gegen die Lauffläche oder die Stahlkante wirken, ist die Form der Lauffläche und der Zustand der Stahlkante für die Kontrolle der Reaktionskräfte von eminenter Bedeutung und daher ein wichtiges Qualitätskriterium für Alpinski. Diese Qualitätskriterien bekommen eine besondere Bedeutung auf Pisten mit einem stark variierenden und unberechenbaren Schneeabräumwiderstand (Eis, fauler Schnee). Auf Pisten mit einem geringen und konstanten Schneeabräumwiderstand (Firn, Pulver), ist hingegen auch ohne hochgezüchtete Technik ein problemloses Steuern möglich. Die Grösse der Reaktionskräfte kann ferner beeinflusst werden oder ausser Kontrolle geraten durch unerwünschte Vibrationen am Ski. Dies tritt insbesondere auf harten Pisten auf, wo unerwartete Vibrationen einen Kontaktverlust der Stahlkante und damit eine Störung des Reaktionskräfte-Gleichgewichtes herbeiführen. (Siehe Kapitel: Schwingung und Schwingungsdämpfung von Alpinski und deren Einfluss auf das Fahrverhalten.)

- Veränderung der Kraftabstände:

Wichtigster Teil aller Bewegungen beim Skilauf ist die Verlagerung des Schwerpunktes

(und damit der Wirkungslinie  $b$ ) in Ski-Längsrichtung. Kontrollierte Schwerpunktverlagerung zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts und zur Aussteuerung von Drehungen ist das wesentlichste Kriterium beim alpinen Skilauf. Diese Verlagerungen des Schwerpunktes werden jedoch von allen Skiläufern völlig unbewusst durchgeführt und daher verstandesmässig nicht bewusst erlebt.

Es ist daher völlig falsch von einem konstanten Lastangriffspunkt am Ski zu sprechen und diese Stelle in eine direkte Beziehung zu anderen Punkten wie z.B. dem Bindungs-Montagepunkt oder dem schmalsten Taillierungspunkt zu bringen. Der Lastangriffspunkt variiert in einem sehr weiten Bereich. Durch diese Variationen werden die Kraftabstände und damit die bei der Steuerung der Drehung wirksamen Momente verändert.

Eine gewisse Rolle bei diesem Kräftesystem spielt auch die Länge des Ski. Je länger der Ski ist, um so grösser werden (bei an sich sonst gleichen Bedingungen) die Abstände  $1_1$  und  $1_2$  und damit auch die für eine Drehung erforderlichen Momente. Lange Ski sind in schwerem Schnee daher auch viel schwieriger zu drehen als kurze Ski.

### 3. Das Kräfte- und Momentsystem bei der Einleitung einer Drehung

Die im vorhergegangenen Abschnitt erläuterten Kräfte, die auf die Lauffläche des Ski wirken und Drehmomente hervorrufen, können nur entstehen, wenn die Lauffläche gegen ein Widerstand bildendes Medium bewegt wird. Das heisst mit anderen Worten, dass eine Querbewegung des Ski mit, zur Bewegungsrichtung leicht gekanteter Lauffläche, die Voraussetzung für solche «Anströmkräfte» ist. Bei Geradeausfahrt, wenn Bewegungsrichtung und Mittellinie des Ski identisch sind, kommt es jedoch an der Lauffläche zu keinen lateral wirkenden Kräften, die zur Bildung von Drehmomenten führen könnten. Eine Richtungsänderung aus der Geradeausfahrt muss daher durch andere Kräfte eingeleitet werden.

Prinzipiell gibt es zwei Hilfsmittel zur Erzeugung eines Drehimpulses beim in axialer Richtung auf einer geraden Bahn bewegten System Skiläufer + Ski:

Die Auslösung eines Drehimpulses kann durch Körperbewegungen des Skiläufers erfolgen – wir sprechen dann von einem dynamischen Mittel – es können jedoch auch Drehimpulse durch den Ski ausgelöst werden – in diesem Fall sprechen wir von einem statischen Mittel.

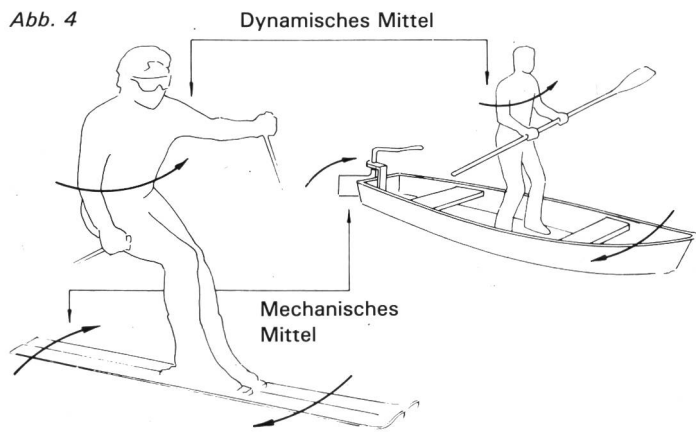
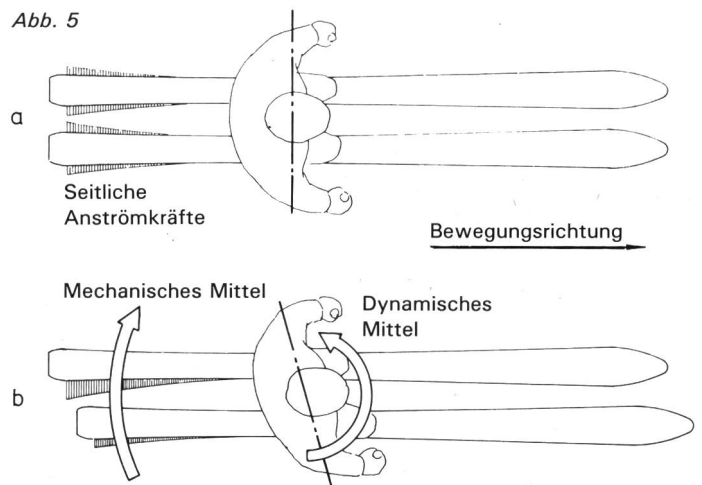


Abb. 4 und 5: Methoden der Schwungeinleitung.



Normalerweise werden beide Mittel gleichzeitig eingesetzt. Es hat sich jedoch in den letzten Jahren immer deutlicher gezeigt, dass durch die Verfeinerung der Schwungtechniken und durch die damit verbundene Hochzüchtung von Hochleistungs-Skimodellen, eine klarere Definition der Wirkungsweise des mechanischen Mittels und dessen Abgrenzung zu der an sich bekannten Wirkungsweise des dynamischen Mittels notwendig ist.

Zur besseren Veranschaulichung des Problems sollen Abb. 4 und Abb. 5 dienen.

In Abb. 4 ist ein in Geradeausfahrt befindlicher Skiläufer dargestellt. Um aus dieser Situation eine Drehung einleiten zu können, muss er ein Drehmoment erzeugen, das er entweder durch dynamische Mittel oder durch statische Mittel oder durch beides gleichzeitig aufbaut.

Die dynamischen Mittel sind:

Antizipation, Gegendrehung, Tiefentlastung und Fersendreh Schub. Die mechanischen Mittel sind in erster Linie die die Schwungeinleitung fördernden Charakteristika der Seitengeometrie des Ski.

Die dynamischen Mittel zur Schwungeinleitung, Antizipation, Gegendrehung, Tiefentlastung und Fersenschub sind ein wichtiger Bestandteil aller nationaler Skilehrpläne und brauchen daher hier nicht näher erläutert zu werden [2] [3] [4]. Da diese Lehrbücher jedoch in erster Linie aus der Sicht des Pädagogen geschrieben wurden, sollen hier die dynamischen Mittel zur Schwungeinleitung im Hinblick auf ihre Mechanik untersucht werden.

Antizipation wird definiert als ein Vorausdrehen der Hüfte und des Oberkörpers im Sinne der folgenden Richtungsänderung. Dadurch wird in dem vorgedrehten Oberkörper potentielle Ener-

gie gespeichert, die in der Folge zur Erzeugung eines Drehmomentes auf die Ski verwendet wird. Dieses Drehmoment wird durch Gegendrehen bewirkt. Darunter versteht man ein aktives Drehen der Beine, das ein entgegengesetztes Drehen des Rumpfes bewirkt.

Damit diese dynamische Wirkung der Antizipation und der Gegendrehung auch dem technisch weniger vorgebildeten Laien besser verständlich wird, wird in Abb. 5 diese Wirkung an einem leichter verständlichen Beispiel, nämlich an einem Ruderboot demonstriert. Wenn der im Boot stehende Mann seinen Oberkörper rasch und kräftig im entgegengesetzten Sinn des Uhrzeigers verdreht, wird sich das Boot im Sinn des Uhrzeigers drehen. Der Physiker erklärt dieses Verhalten mit der «Konstanz des Drehimpulses eines freien Systems» [5]. Einfacher ausgedrückt heisst dies, dass die Aktion des Mannes eine Reaktion des Bootes auslöst oder mit anderen Worten, die Bewegung des Mannes löst eine entgegengesetzte Bewegung des Bootes aus.

Das gleiche geschieht auch beim System Skiläufer + Ski. Die Drehbewegung der Schulter bewirkt eine entgegengesetzte Drehung der Ski.

Da das durch die Drehung des Oberkörpers auf die Ski übertragene Drehmoment bei manchen Schneearten nicht ausreichen würde, um die Schneewiderstände zu überwinden, werden bei dieser Art der Schwungeinleitung Tiefentlastung und Fersendreh Schub als weitere dynamische Hilfsmittel eingesetzt. Die Tiefentlastung reduziert den Drehwiderstand, der Fersendreh Schub vergrössert das Drehmoment.

Führen die dynamischen Mittel zu Schwungarten mit betonter Rutschphase, so ist für die Einleitung von geschnittenen Schwüngen der

Einsatz der mechanischen Mittel von besonderer Bedeutung. Unter mechanischem Mittel versteht man den Beitrag, den der Ski und insbesondere seine geometrische Form zur Schwungeinleitung leisten.

Was darunter zu verstehen ist, ist in Abb. 5 dargestellt. Das obere Bild a zeigt einen Skifahrer bei Geradeausfahrt. Bewegungsrichtung und Ski-Mittellinie sind identisch. Beide Ski sind flach gestellt und gleichmässig belastet. Bei dieser Fahrweise bilden sich durch die zunehmende Verbreiterung des Ski zwischen Bindungsbereich und Skiende an der Seite des Ski Anströmkräfte, die darauf zurückzuführen sind, dass durch diese keilförmige Form des hinteren Skiteiles Schnee seitlich verdrängt werden muss. Die Grösse dieser Anströmkräfte variiert mit dem Schneezustand. Sie ist gering auf Eis und gross bei Schnee mit hohem Abräumwiderstand. Bei Fahrweise nach Bild 5a sind diese seitlichen Kräfte an beiden Seiten des Ski gleich gross und heben sich daher gegenseitig auf. Bei Geradeausfahrt haben diese, von der Seitenform des Ski herrührenden Kräfte einen wichtigen Stabilisierungseffekt zu erfüllen, da ein unbeabsichtigtes Abweichen der Skimittellinie von der Bewegungsrichtung sofort korrigierende Drehmomente am Skiende aufbaut.

Die Abb. 5b zeigt die Veränderung der seitlichen Anströmkräfte bei Verlagerung der Belastung auf die rechte Skikante, insbesondere auf die des (linken) Talski. Da durch das betonte Aufkanten auf die rechte Kante die linke Kante von der Schneeoberfläche abgehoben wird, werden auf dieser Seite die Anströmkräfte völlig abgebaut. An der rechten Seite kommt es hingegen durch die verstärkte Anpresskraft zu einer Vergrösserung der seitlichen Anströmkräfte. Die

auf diese Weise bewirkte Instabilität der seitlichen Kräfte bewirkt ein Drehmoment, das den Ski im Uhrzeigersinn dreht. Bei Ski mit einer Seitengeometrie, die diese Wirkung auf die Schwungeinleitung besonders berücksichtigt, können geschnittene Schwünge in erster Linie durch Kanteneinsatz eingeleitet werden, wobei auf den Einsatz der bereits geschilderten dynamischen Mittel teilweise verzichtet werden kann. (Siehe Kapitel: Die Seitengeometrie von Alpinski und deren Einfluss auf das Fahrverhalten.)

Die hier geschilderte Wirkung der Seitengeometrie auf die Schwungeinleitung kann dem technisch weniger versierten Laien wieder am Beispiel des Ruderbootes leichter erklärt werden. Beim Boot übernimmt das Steuerruder eine ähnliche steuernde und stabilisierende Funktion, wie die Seitenform des Ski in seinem Endbereich. In beiden Fällen sind es Anströmkräfte, die ein Drehmoment bewirken, das zur Durchführung einer Richtungsänderung benutzt wird. In beiden Fällen ist die Wirkung von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Sie ist gross bei hoher Geschwindigkeit, jedoch kaum vorhanden bei langsamer Fahrweise. Daraus ist erklärbar, warum die dynamischen Mittel bei langsamer Fahrweise unentbehrlich sind, bei hohem Tempo jedoch die mechanischen Mittel an Bedeutung gewinnen.

#### 4. Das Kräfte-System bei Geradeausfahrt

Eine Studie über die Mechanik des alpinen Skilaufs wäre unvollständig ohne eine Betrachtung über die Kräfte, die bei Geradeausfahrt auftreten. Die in den vorhergegangenen Kapiteln erläuterten Kräftesysteme, bei Einleitung und Aussteuerung einer Drehung, sind von sehr allgemeinem Interesse, denn sie sind ein wesentliches Element, nicht nur des Rennlaufs, sondern auch des sogenannten Vergnügungsskilaufs. Die Kräfte hingegen, die bei Geradeausfahrt auftreten, sind für den Vergnügungsskiläufer von geringem Interesse, ihre Kenntnis spielt jedoch bei der wissenschaftlichen Vorbereitung von Abfahrtsrennen eine wichtige Rolle.

Obwohl bei einem Abfahrtslauf an Mut und physische Kondition des Rennläufers grosse Anforderungen gestellt werden, spielen gerade bei dieser Disziplin Fragen der Ausrüstung und der wissenschaftlichen Analyse von Testresultaten eine wichtige Rolle. Die Mitglieder der im Abfahrtslauf führenden Nationalteams sind vor Beginn jeder Saison häufig Gäste von physikalisch-technischen Universitätsinstituten, um ihre Ausrüstung oder ihre Körperhaltung nach den neuesten Erkenntnissen der Sportwissenschaft überprüfen zu lassen. Wissenschaftliche

Tests von Abfahrtsrennski sind überaus kompliziert und erfordern einen grossen Aufwand an technischem Gerät (6). Es würde den Rahmen dieser Abhandlung sprengen, wollten wir alle Einflussgrössen beim «Gleiten» und bei «Schussfahrt» detailliert analysieren. Es ist jedoch für ein Verständnis der Mechanik des Skilaufs unbedingt nötig, über die bei Geradeausfahrt auftretenden Kräfte und ihren Einfluss auf Beschleunigung oder Geschwindigkeit Bescheid zu wissen.

Gleichgewicht stehen und einen wichtigen Stabilisierungseffekt haben. Die Grösse dieser seitlichen Kräfte und damit auch ihre in Ski-Längsrichtung wirkende Komponente ist eine Funktion der Geschwindigkeit. Diese in Bewegungsrichtung wirkende Komponente wirkt entgegen der Beschleunigungskraft und wirkt daher geschwindigkeitsvermindernd. Wir bezeichnen diese Komponente als Pflugwiderstand des Skihinterteils. Es ist eine wichtige Charakteristik von erfolgreichen Abfahrtski, dass deren Sei-

Abb. 6

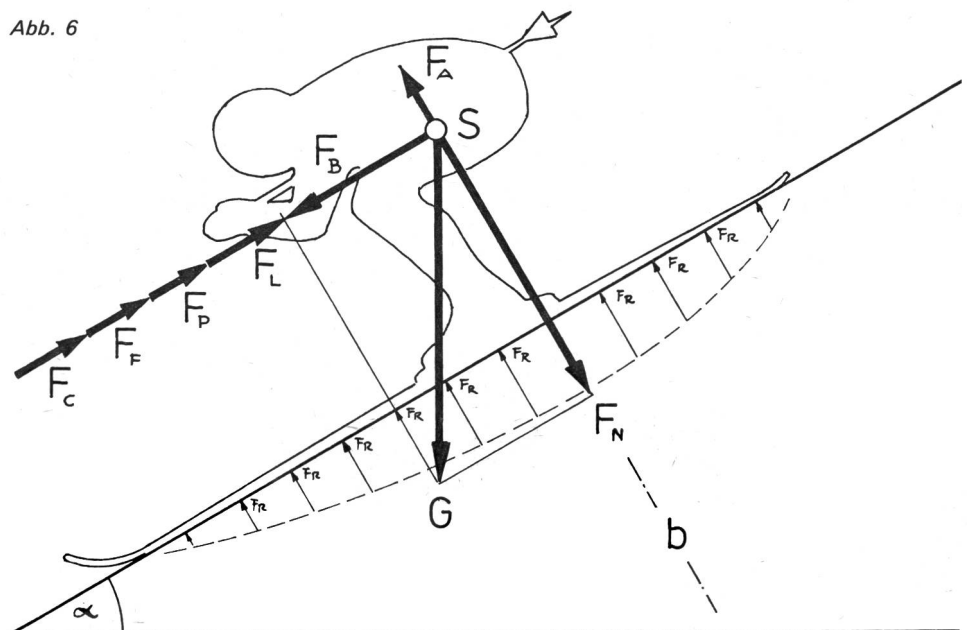


Abb. 6: Das Kräftesystem bei Geradeausfahrt.

- $\alpha$  = Winkel der Hangneigung
- S = Massenschwerpunkt des Systems Skifahrer + Ski
- b = Wirkungslinie der Normalkraft
- G = Gewicht des Systems Skifahrer + Ski
- $F_N$  = Normalkraft
- $F_B$  = Beschleunigungskraft (Hangabtriebskraft)
- $F_L$  = Luftwiderstand
- $F_P$  = Pflugwiderstand des Skihinterteils
- $F_F$  = Gleitreibungswiderstand
- $F_C$  = Schneekompressionswiderstand
- $F_A$  = Auftriebskraft
- $F_R$  = Reaktionskräfte an der Ski-Lauffläche

Betrachten wir zunächst noch einmal Abb. 5a in der ein Skifahrer bei Geradeausfahrt dargestellt ist. Wir erinnern uns, dass bei dieser Situation im hinteren Bereich des Ski laterale Anströmkräfte auftreten, die bei flachgestelltem Ski im

teingeometrie so gestaltet ist, dass zwar ein ausreichender Stabilisierungseffekt, jedoch ein möglichst geringer Pflugwiderstand auftritt.

Die in den anderen Raumachsen wirkenden Kräfte bei Geradeausfahrt sind in Abb. 6 dargestellt:

1. Das Gewicht G des Systems Skiläufer + Ski greift im Schwerpunkt S des Systems an. Hangneigung und Gewicht G bestimmen die Grösse der Beschleunigungskraft  $F_B$ . Hohes Gewicht von Skiläufer und Ausrüstung sind daher bei Abfahrtsrennen ein geschwindigkeitsfördernder Vorteil.
2. Die Normalkraft  $F_N$  ist die im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung wirkende Komponente. Ihre Grösse wird bei konstantem G bestimmt durch den Neigungswinkel  $\alpha$ . Mathematisch formuliert ist  $F_N = G \cdot \cos \alpha$

$F_N$  ist gering bei grosser Hangneigung und gross bei flachem Gelände. Da der Reibungswiderstand der Lauffläche eine Funktion von  $F_N$  ist, kann abgeleitet werden, dass der Reibungswiderstand mit zunehmendem Hangneigungswinkel abnimmt.

3. Die Beschleunigungskraft  $F_B$  ist die in Bewegungsrichtung wirkende Komponente von  $G$ . Mathematisch formuliert ist

$$F_B = G \cdot \sin \alpha$$

Die Grösse der Beschleunigungskraft wird bei konstantem  $G$  bestimmt durch den Hangneigungswinkel  $\alpha$ .  $F_B$  nimmt zu mit zunehmender Hangneigung.

4. Der Luftwiderstand  $F_L$  wirkt der Beschleunigungskraft entgegen. Die mathematische Formel für den Luftwiderstand lautet

$$F_L = \frac{c p A v^2}{2}$$

Darin bedeutet:

- c – mittlerer Luftwiderstandsbeiwert des Skiläufers + Ausrüstung
- p – Luftdichte
- A – Schattenfläche des Skiläufers + Ausrüstung (projiziert in Bewegungsrichtung)
- v – Geschwindigkeit

Aus dieser Formel kann abgeleitet werden:

- a) Ein kleiner Luftwiderstandsbeiwert verringert den Luftwiderstand. Glatte Kleidung und aerodynamisch richtige Haltung sind daher ein wesentlicher Faktor beim Abfahrtslauf.
- b) Die Luftdichte beeinflusst den Luftwiderstand, ist jedoch vom Skiläufer nicht beeinflussbar. Dass jedoch die Luftdichte zum Beispiel bei Geschwindigkeits-Rekordversuchen (Kilometro Lanciata) eine gewisse Rolle spielt, zeigt die folgende Vergleichstabelle (7):

Meereshöhe, Meter	0	500	1000	2000	3000	3500
Luftdichteverhältnis $P/p_0$	1.0( $p_0$ )	0.95	0.90	0.81	0.73	0.69

Aus dieser Tabelle können wir ablesen, dass der Luftwiderstand bei den Ski-Geschwindigkeits-Rekordfahrten am Monte Rosa (Cervinia), die in einer Höhe von 3500 m über dem Meeresspiegel stattfinden, um etwa 30 Prozent geringer ist, als bei einem Rennen, das etwa auf Meereshöhe durchgeführt wird.

- c) Die Schattenfläche beeinflusst entscheidend den Luftwiderstand. Bei einem Weltcup-Abfahrtslauf hat nur der Läufer eine Chance,

der ständig in tiefer Hocke fahren kann und damit seine Schattenfläche auf ein Minimum reduziert.

- d) Der Luftwiderstand steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Das heisst, dass bei den hohen Geschwindigkeiten eines Abfahrtslaufes dem Luftwiderstand eine grössere Bedeutung zukommt, als anderen Komponenten, wie Gleitreibungswiderstand oder Schneekompressionswiderstand.
- 5. Der Pflugwiderstand des Ski  $F_P$  wurde bereits beschrieben. Seine Grösse hängt von der Seitenform des Ski, vom Zustand des Schnee und von der Geschwindigkeit ab.
- 6. Der Gleitreibungswiderstand  $F_F$  wird mathematisch formuliert mit

$$F_F = \mu_k (F_N - F_A)$$

$\mu_k$  ist der mittlere Gleitreibungskoeffizient der Skilauffläche. Von allen physikalischen Kenngrössen am Ski ist der Gleitreibungskoeffizient der wohl am schwierigsten zu ermittelnde Wert. Obwohl überaus interessante Untersuchungen vorliegen (8), ist es auch im Rennsport bis heute nicht gelungen, die Probleme um den Reibungskoeffizienten zwischen Lauffläche und Schnee eindeutig zu beherrschen. Der Grund dafür liegt in der grossen Variationsbreite des Reibungspartners Schnee. Das Gleiten des Ski auf Schnee ist kein so einfaches Phänomen wie etwa der Gleitvorgang zwischen Metallen oder Kunststoffen. Der Gleitvorgang auf Schnee ist physikalisch sehr kompliziert und für die Belange des Ski-Rennlaufs bis heute nicht völlig erforscht, obwohl gründliche Studien zu diesem Phänomen durchgeführt wurden (9). Schwer erforschbar ist der von Temperatur und Wassergehalt des Schnee abhängige Gleitmechanismus mit hydromechanischer Schmierung, der dazu führt, dass die Reibungszahl  $\mu_k$  mit der Schneebeschaffenheit und der Geschwindigkeit stark variiert. Kom-

plizierend wirkt ferner die Tatsache, dass die Reibungszahl  $\mu_k$  durch Vibrationsvorgänge am Ski in günstigem Sinne beeinflusst werden kann (siehe Kapitel: Schwingung und Schwingungsdämpfung von Alpinski und deren Einfluss auf das Fahrverhalten).

- 7. Der Schneekompressionswiderstand  $F_C$  ist die Kraftkomponente, die aufgewendet werden muss, um den Schnee innerhalb der gefahrenen Spur zu komprimieren. Auf Eis

ist dieser Wert selbstverständlich null, bei faulem Schnee unter Umständen von Bedeutung. Der Skikonstrukteur versucht, durch geeignete Form der Schaufel und durch ausreichende Flexibilität des Skivorderteiles den Wert  $F_C$  so gering als möglich zu halten. Dies steht in Zusammenhang mit:

8. Der Verteilungskurve der Reaktionskräfte  $F_R$ . Diese Kurve beschreibt die Grösse der Flächenpressung an der Lauffläche bei flach gestelltem Ski. Bei Geradeausfahrt ist:

$$\sum F_R = F_N - F_A$$

Bei nicht geradliniger Fahrt ist die Flächenpressung durch Zentrifugalkräfte oder wechselnde Skibelastung einem ständigen starken Wechsel ausgesetzt. Die Kurve der Flächenpressung wird bestimmt durch die Position der Wirkungslinie  $b$  der Normalkraft, durch die Grösse der Normalkraft und durch die Steifheitsverteilung des Ski.

9. Die Auftriebskraft  $F_A$  kann bei bestimmter aerodynamischer Haltung auftreten und wird daher im Kräfteschaubild berücksichtigt.

Mit Hilfe der oben erwähnten Kräfte und Gleichungen lässt sich die Hauptgleichung für die Maximalgeschwindigkeit  $v$  die ein Skifahrer erzielen kann, durch folgende Formel ausdrücken (6), (7):

$$v = \sqrt{2 \frac{(G \sin \alpha) - \mu_k (G \cos \alpha - F_A) - F_P - F_C}{c A p}}$$

Zur Erzielung von Höchstgeschwindigkeiten im Ski-Rennsport ist es erforderlich zu untersuchen, durch welche Massnahmen die in dieser Formel genannten Grössen im günstigen Sinn beeinflusst werden können. Es sind dies sowohl Massnahmen die die Ski-Konstruktion betreffen (Biegelinien, Seitenform, Reibungskoeffizient, Vibrationsverhalten), als auch Massnahmen die den Skiläufer betreffen (Schattenfläche, Luftwiderstandsbeiwert).