

## **Bergsteigen und Klettern – was sagt die Physik dazu? \*)**

\*) aktualisierter Beitrag (31.08.2007) aus Physik in unserer Zeit 2 (32) 2001 S. 62 – 68

Tina Czermin, Peter Dullnig, Leopold Mathelitsch, Werner B. Schneider

(Version vom 7.9.2007)

### **Vorbemerkung**

Klettern hat als Sportart in den letzten Jahren einen deutlichen Aufschwung erlebt, wobei die Attraktion durch das Angebot künstlicher Kletteranlagen noch verstärkt worden ist. Diese zusätzlichen Möglichkeiten beeinflussten sicherlich auch die Überlegungen, Klettern in das Schulsportprogramm aufzunehmen. So ist z.B. in Bayern Klettern im Rahmen des differenzierten Sportunterrichts fest verankert. In einem dafür eigens erstellten Lehrplan, der in enger Zusammenarbeit mit dem Alpenverein erarbeitet worden ist, werden dem Lehrer Hinweise zur Gestaltung entsprechender Sportstunden gegeben. Immer mehr Schulen werden mit Kletterwänden - sowohl in Sporthallen als auch in den Pausenhöfen - ausgestattet.

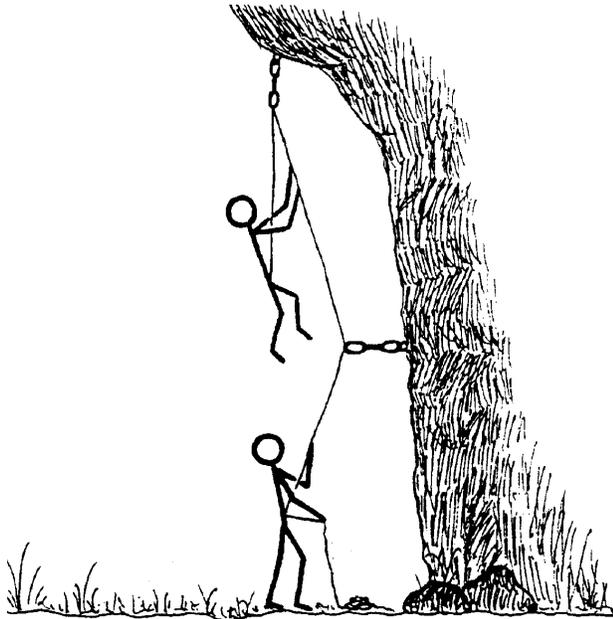
Beim Klettern und Bergsteigen stehen in erster Linie sportliche Leistung, Kameradschaft, Freude an der Bewegung und an der Natur im Vordergrund. Es sollte aber nicht vergessen werden, dass physikalische Gesetzmäßigkeiten Grenzen bzw. Rahmenbedingungen beim Klettern setzen. Technische Entwicklungen helfen andererseits, sich diesen Grenzen immer mehr zu nähern bzw. innerhalb der Grenzen dem Sportler eine größere Sicherheit zu bieten. Im Folgenden sollen diese physikalischen Aspekte des Kletterns und Bergsteigens anhand einiger Beispiele illustriert werden.

### **Kraftwandler und Klettern**

Seilsicherungen sollten beim Klettern, selbst auf Kletterwänden in Hallen, eine Selbstverständlichkeit sein. Seile dienen aber nicht nur zur Sicherung sondern auch um größere Kräfte einsetzen zu können. Dabei wird das Prinzip des Flaschenzugs verwendet. Allerdings ist es oft schwer, die von der Schulphysik bekannten idealen Darstellungen zu erkennen: Rollen sind durch Karabiner ersetzt, dünne Schnüre durch Seile.

An einer festen Rolle gibt es eine Kraftumlenkung, d.h. an beiden Seiten der Rolle herrscht dem Betrag nach die gleiche Kraft. Zieht sich ein Kletterer an einer festen Rolle hoch, so wirkt auf

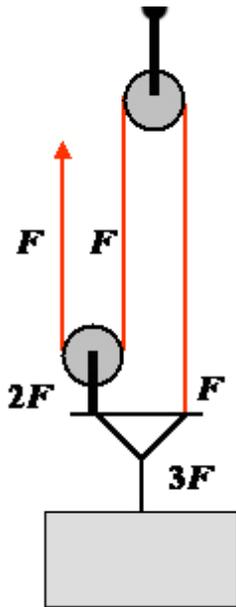
beide Seilstücke nur das halbe Gewicht des Kletterers Abb. 1. Allerdings muss er für 0,5 m Höhengewinn 1m Seil durch seine Hände ziehen. Durch die feste Rolle kommt es in diesem Fall zu einem Kraftgewinn.



**Abb. 1:** Selbstseilrolle. Der Kletterer zieht sich selbst nach oben; die Person am Boden übernimmt nur die Sicherung.

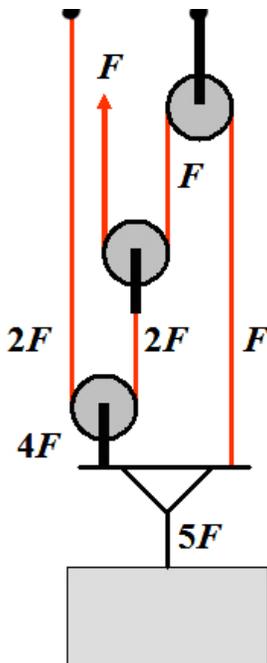
Zur Unterstützung von Erschöpften und zur Bergung von Verletzten werden häufig sogenannte Schweizer Flaschenzüge verwendet, eine einfache Version ist in Abb. 2 gezeigt, eine aufwändigere in Abb. 3. Für die Berechnung der idealen Kraftumsetzung kann man folgende Regel nutzen: Entlang eines Seiles herrscht überall eine betragsmäßig gleich große Kraft. Jede Rolle verteilt also die an ihrer Achse angreifende Kraft gleichmäßig auf beide Seilstücke. Im Modell von Abb. 2 ist ersichtlich, dass die Zugkraft  $F$  in allen drei Seilstücken gleich wirkt, die Gesamtkraft daher dreimal so groß ist. Beim Schweizer Flaschenzug von Abb. 3 ergibt sich mit gleicher Überlegung eine Kraftübersetzung von 1:5.

Die beiden Abbildungen zeigen den Zusammenhang zwischen dem theoretischen Modell und der Realisierung am Berg. In Abb. 2 entspricht der losen Rolle der linke Karabiner, der rechte Karabiner dient zur Kraftumlenkung. Die Kraftübertragung zum losen Karabiner erfolgt über die dunklere Reepschnur, die mit dem Hauptseil fix verbunden ist. Die rechte, hellere Reepschnur ist oben verankert, mit dem Seil fest verbunden und dient als Rücklaufsperr.



**Abb.2:** Schweizer Flaschenzug mit Kraftumsetzung 1:3 im Modell (links) und am Berg (rechts).

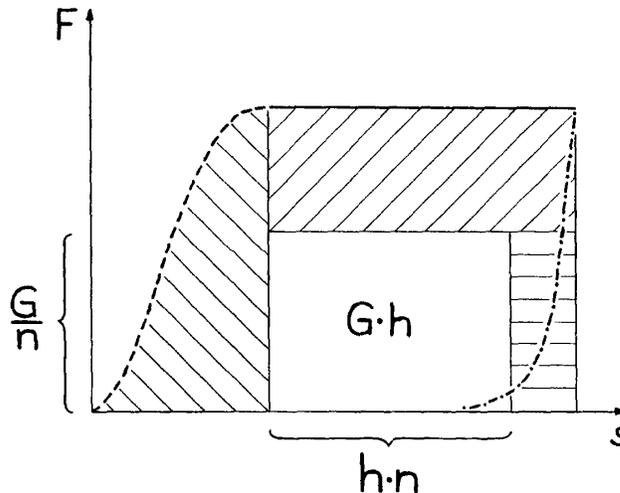
Reepschnüre: Polyamid-Schnüre mit einem Durchmesser von 4 bis 9mm, die wie die Seile in Kern-Mantel-Konstruktion gefertigt werden, aber im Gegensatz zu diesen Seilen nicht elastisch sind. Weitere Informationen über Seile, Knoten und Sicherung findet man z.B. unter: <http://www.dietmarhahm.de>



**Abb. 3:** Schweizer Flaschenzug mit Kraftumsetzung 1:5 im Modell (links) und am Berg (rechts).

Die beiden „losen Karabiner“ werden über ein unelastisches Band (blau-weiß) am Fels befestigt (oben, außerhalb des Bildes). Die Verbindung des unteren losen Karabiners zum Seil (blau-weiß) erfolgt wie in Abb. 2b über eine Reepschnur (dunkelblau-gelb) mit Prusikknoten. Der Knoten in den parallel angeordneten Karabinern (rechts oben) heißt Garda-Schlinge und dient als Rücklauf Sperre. Diese beiden Karabiner sind mit einem Band am Fels befestigt (oben, außerhalb des Bildes).

Für alle drei kraftgewinnenden Anordnungen ist die in Abb. 4 gezeigte Zugweg-Zugkraft-Relation typisch. In der Vordehnphase wird nur Dehnungsarbeit verrichtet, die Last wird noch nicht bewegt. In der zweiten Phase wird die Last gehoben. Danach ergibt sich eine (meist geringe) Senkung der Last, bis die Rücklaufsperre blockiert. Die Energieverluste (schraffiert gezeichnet) ergeben sich aus Reibung, Dehnung des Seils und durch Senkung der Last aufgrund des Durchlaufs.



**Abb. 4:** Zugweg-Zugkraft-Diagramm eines Flaschenzugs für reale Seile. Das Gewicht  $G$  wird um die Höhe  $h$  gehoben,  $n$  ist die theoretische Untersetzung. Die gestrichelte Linie zeigt die Vordehnphase, die durchgezogene die Hubphase und die strichpunktirierte Linie die Blockierphase. Die schraffierten Flächen entsprechen den Energieverlusten: links - Energieverluste durch Reibung und Dehnung, oben - Verluste durch Reibung, rechts - Verluste durch Absinken des Gewichts aufgrund des Seildurchlaufs durch die Rücklaufsperre.

Aus der gemessenen maximalen Zugkraft  $F_{\max}$ , die zur Hebung der Last notwendig ist, und dem Gewicht kann man die effektive Untersetzung berechnen:

$$u_{\text{eff}} = \frac{G}{F_{\max}}$$

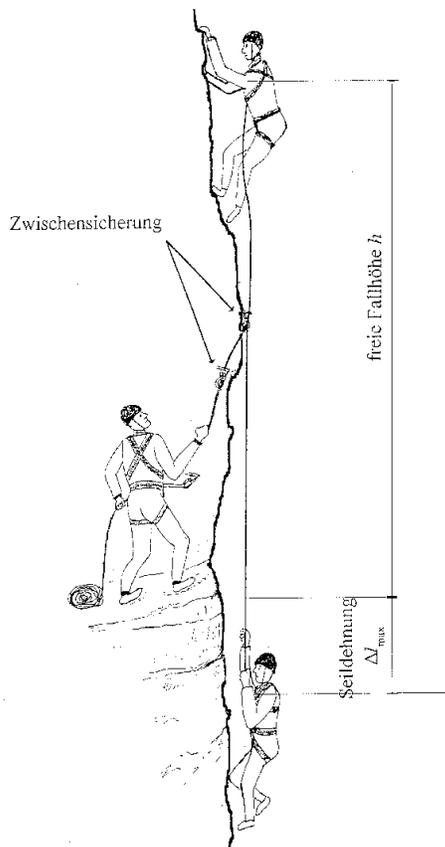
Messungen von H. Mägdefrau [1] ergaben für die lose Rolle  $u_{\text{eff}} = 1,4$  (Idealfall  $u_{\text{ideal}} = 2$ ), so dass der Wirkungsgrad für die Untersetzung  $\eta = u_{\text{eff}} / u_{\text{ideal}} = 0,7$  beträgt. Für den Schweizer Flaschenzug wurde vom gleichen Autor  $u_{\text{eff}} = 2,2$  gemessen ( $u_{\text{ideal}} = 5$ , Wirkungsgrad  $\eta = 0,44$ ). Diese Wirkungsgradangaben beziehen sich auf die jeweils maximale Zugkraft. Vergleicht man dagegen die tatsächlich aufzuwendende Arbeit mit der genutzten, so muss man noch die Seildehnung und die Rücklaufbremsung berücksichtigen. Die Ergebnisse hängen dann auch von der Seil-

länge ab. Man erhält z.B.  $\eta_{real} = 0,45$  für die lose Rolle (Seillänge 1,4 m) bzw.  $\eta_{real} = 0,35$  für den Schweizer Flaschenzug (Seillänge 2,38 m).

### Die Wahl des richtigen Seils zur Sicherung

Die größte Gefahr beim Bergsteigen und Klettern ist ein Absturz. Um die Folgen eines solchen Ereignisses zu mindern, sichert sich der Kletterer im Allgemeinen mit einem Seil. Er ist dazu mit einem oder mehreren Kameraden verbunden; beim Klettern läuft das Seil zusätzlich über Zwischensicherungen, etwa Haken (siehe Abb. 5).

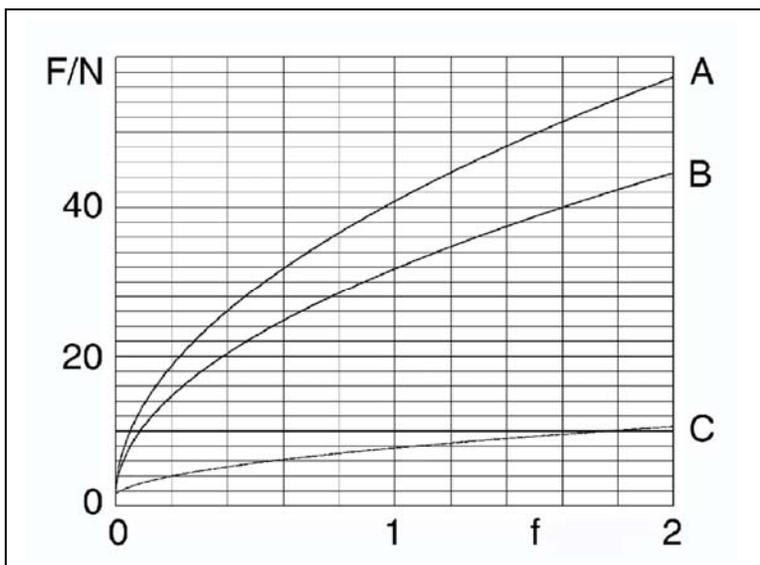
Bei einem Absturz wird der Kletterer über das Seil aufgefangen („Sturz ins Seil“). Zunächst könnte man annehmen, dass die Sicherheit mit der Belastbarkeit des Seils zunimmt. So gesehen müssten Stahlseile am sichersten sein. Dies ist aber nicht so. Der Sturz in ein Stahlseil ist ungleich gefährlicher als der in ein modernes Sicherungsseil aus Kunststoff. Ein Stahlseil hat einen sehr geringen Dehnungskoeffizienten, so dass Bremsweg und Bremszeit vergleichsweise kurz und auftretende Beschleunigungen und Kräfte entsprechend groß sind.



**Abb. 5:** Skizze zum Sturz ins Seil bei einer rein statischen Sicherung, d.h. keine Gurt- bzw. Körperdehnung, kein Seildurchlauf. Im Bild sind die zwei Situationen dargestellt. Zunächst der sich noch oben befindliche Kletterer, der dann beim Sturz die Strecke  $h + \Delta l_{max}$  (gesamte Fallhöhe) durchfällt.

Im Sprachgebrauch der Kletterer ist es üblich, die maximale Kraft, die beim Sturz ins Seil auftritt, mit *Fangstoß* zu bezeichnen (siehe Kasten 1). Je geringer die Elastizität des Seils, desto größer wird beim Sturz der Fangstoß. Eine mindestens ebenso große Bedeutung für die Sicherheit hat neben der Belastbarkeit daher die Dehnbarkeit des Seils. In der Fachsprache wird diese durch den *Seilmodul*  $M$  beschrieben, der jene Kraft angibt, welche die Länge des Seils dem Hookeschen Gesetz folgend verdoppeln würde, wenn das überhaupt möglich wäre. Je kleiner der Seilmodul, desto dehnbarer ist also das Seil (siehe Kasten 1). Die Dehnung eines Seils hängt aber - bei festem Seiltyp und Seilmodul - auch von seiner Länge ab. Verdoppelt man z.B. die Länge, so wird, bei gleicher dehnender Kraft, die Dehnung verdoppelt. Die Stärke des Fangstoßes beim Sturz hängt also nicht nur, wie man vielleicht zunächst glaubt, von der durchfallenen Höhe  $h$  und dem Seilmodul  $M$  ab, sondern auch von der Länge  $l_0$  des „ausgegebenen Seils“ (das ist die Seillänge zwischen dem Kletternden und Sichernden in ungedehntem Zustand. Eine genauere Betrachtung (siehe Kasten 1) zeigt, dass der entscheidende Parameter  $f = h/l_0$  ist. Er wird mit *Sturzfaktor* bezeichnet.

Im Kasten 1 findet man die Herleitung einer Gleichung für den Fangstoß. Sie zeigt, dass dieser bei gegebenem Gewicht  $G$  des Kletterers und gegebenem Seilmodul  $M$  lediglich noch vom Sturzfaktor  $f$  abhängt. Dabei tritt der für den Kletterer schlimmste Fall  $f = 2$  dann auf, wenn der Sportler, ohne Zwischenhaken gesichert, senkrecht nach oben klettert und dann die doppelte Seillänge fällt. Abb. 6 zeigt die bei einem gesicherten Absturz auftretenden Fangstöße für verschiedene Seilarten in Abhängigkeit vom Sturzfaktor, berechnet nach der Formel in Kasten 1:



**Abb.6:** Fangstoß für einen Kletterer vom Gewicht  $G = 800\text{N}$  in Abhängigkeit vom Sturzfaktor  $f$  für drei Seilarten: (A) Drahtseil mit  $M = 1000\text{ kN}$ , (B) Hanfseil mit  $M = 600\text{ kN}$  und (C) modernes Kletterseil mit  $M = 30\text{ kN}$ .

Ein Drahtseil (Durchmesser 1 cm) hat typischerweise einen Seilmodul von  $M = 10^6$  N [3]. Fällt ein Kletterer der Masse 80 kg in dieses Seil, so ergibt sich bei einem angenommenen Sturzfaktor von nur  $f = 1$  (s. Kasten 1) ein Fangstoß von  $F_{\max} \approx 40$  kN. Dies entspricht einer Beschleunigung von 50 g! (g: Erdbeschleunigung). Bei horizontaler Lage des Stürzenden können nach Mägdefrau [4] bereits Beschleunigungen von 3-5 g lebensgefährlich werden [4] (bei senkrechtem Sturz in einen Klettergurt ergibt sich eine Gesundheitsgefährdung im Allgemeinen erst bei mehr als 10 g [5]). Dies zeigt, dass ein Stahlseil beim Klettern zur Sicherung nicht verwendet werden darf.

Hanfseile, die bis zum zweiten Weltkrieg in Gebrauch waren, haben auch einen vergleichsweise großen Seilmodul  $M$ , nämlich 600 bis 800 kN [1]. Ein Sturz ins Hanfseil bedingt einen entsprechend großen Fangstoß, durch den zusätzlich der sichernde Begleiter aus dem Stand gehoben und mitgerissen werden kann. Außerdem kann das Seil reißen. Ein entscheidender Fortschritt für die Sicherheit beim Klettern stellte die Entwicklung von Kunststoffseilen dar, die durch ihre große Elastizität ein sehr großes Energieaufnahmevermögen besitzen. Die technische Ausführung erfolgt in einer Kernmantelkonstruktion: Ein tragender Seilkern wird von einem schützenden Mantel umgeben. Entscheidend für Elastizität, Dehnungsverhalten oder Bruchfestigkeit ist jedoch der Kern. Kletterseile haben einen Seilmodul  $M$  von etwa 20 bis 30 kN. Daraus erhält man für  $G = 800$  N und  $f = 1$  einen Fangstoß  $F_{\max}$  von 6 bis 8 kN und eine maximale relative Seildehnung um ca. 30% von  $l_0$ . Neben den energieaufnehmenden Seilen benötigt man beim Klettern z.B. zur Übertragung von Kräften, zur Befestigung von Haken oder zur Herstellung von Bremsvorrichtungen auch unelastische Seile (Reepschnüre (rund)) oder Bänder (flach), die aus dem gleichen Grundmaterial wie die Kletterseile aufgebaut sind.

Nach Glg. 3 im Kasten 1 ist der Fangstoß bei gleichem Sturzfaktor nicht von der Fallhöhe  $h$  abhängig, daher sollten ein Sturz ins Seil aus 1 m bzw. 10 m Höhe bei gleichem Sturzfaktor den gleichen Fangstoß ergeben. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass der Sturz aus 10 m Höhe viel gefährlicher ist. Für diese Diskrepanz gibt es zwei Gründe: Erstens hängt eine Verletzung nicht nur von der einwirkenden Kraft ab, sondern auch davon, wie lange diese Kraft am Körper einwirkt. Die Bremsphase dauert bei einem Sturz aus 1 m Höhe für  $f = 1$  und  $M = 30$  kN etwa 0,1 s, die aus 10 m etwa 0,3 s. Zweitens ist bei der Herleitung in Kasten 1 vorausgesetzt, dass die kinetische Energie des Fallenden nur vom Seil aufgenommen wird, d.h. sowohl die Seilverankerung als auch der Körper des Fallenden werden als starr angenommen. Beides ist nicht realistisch.

**Kasten 1: Fangstoß**

Nehmen wir vereinfacht an, dass die rücktreibende Kraft  $F$  des Seiles der Dehnung  $\Delta l$  proportional ist (Hookesches Gesetz)

$$F = k \cdot \Delta l. \quad (1)$$

Mit der Seillänge  $l_0$  kann diese Gleichung umgeschrieben werden:

$$F = k \cdot l_0 \cdot \frac{\Delta l}{l_0} = M \cdot \varepsilon,$$

wobei mit  $M = k \cdot l_0$  der Seilmodul und mit  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  die relative Seildehnung bezeichnet wird. Unter

Benutzung dieser Begriffe gewinnt das Hookesche Gesetz folgende einfache Form: Beträgt die relative Dehnung des Seiles  $\varepsilon$  (z.B.  $\varepsilon = 1/10$ ), so ist die dehnende Kraft  $\varepsilon \cdot M$  (im Beispiel also 1/10 des Seilmoduls).

Fällt eine Person (Gewicht  $G$ ) aus einer Höhe  $h$  in ein Seil der Länge  $l_0$ , so wird die potentielle Energie der Person zunächst in kinetische Energie und dann in Spannenergie (Seil) umgewandelt, was zu einer maximalen Dehnung  $\Delta l_{\max}$  (siehe Abb. 5) des Seils führt. Aus dem Energieerhaltungssatz folgt:

$$W_{\text{pot}} = G \cdot (h + \Delta l_{\max}) = W_{\text{Spann}} = \frac{1}{2} k \cdot \Delta l_{\max}^2$$

Daraus ergibt sich für die größte Seildehnung

$$\Delta l_{\max} = \frac{1}{k} \left( G + \sqrt{G^2 + 2G \cdot h \cdot k} \right) \quad (2)$$

und für die maximal einwirkende Kraft, den Fangstoß

$$F_{\max} = G \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot M \cdot f}{G}} \right), \quad (3)$$

wobei der Quotient  $h/l_0$  durch  $f$  ersetzt wurde.  $f = h/l_0$  wird als Sturzfaktor bezeichnet ( $h$ : freie Fallhöhe,  $l_0$ : Länge des ungedehnten Seiles).

Der Fangstoß ist nicht direkt von der Fallhöhe  $h$  abhängig, sondern nur vom Verhältnis zwischen Fallhöhe und ausgegebenem Seil. Die Werte von  $f$  liegen immer zwischen 0 und 2, wobei  $f = 2$  nur dann erreicht wird, wenn der Sportler über die Sicherung hinaus um  $l_0$  senkrecht nach oben klettert und dann um  $h = 2 \cdot l_0$  stürzt.

Heute versucht man die Sicherung dynamisch zu gestalten (siehe nächster Abschnitt). Der extreme Fall einer starren Sicherung tritt praktisch nur dann ein, wenn sich das Seil verklemmt. Außerdem ist der Kletterer mittels eines Hüft- oder Ganzkörpergurts mit dem Seil verbunden. Sowohl Gurt als auch Körper verlängern den Bremsweg um insgesamt 20 bis 30 cm. Auch der Körper kann Energie aufnehmen. Bei Belastungen von etwa 2 bis 3 kN (2 m Fallhöhe) nehmen Knoten, Gurt und Körper ungefähr 0,5 kJ Energie auf, dies ist etwa ein Viertel bis ein Drittel der gesamten aufzunehmenden Energie [4].

Nach dem bisher gesagten können die Folgen eines Sturzes durch einen längeren Bremsweg verringert werden. Auf den ersten Blick erscheint ein Seil mit kleinem Seilmodul für Sicherungsaufgaben beim Klettern besonders geeignet. Die für das Bungeespringen verwendeten Seile sollten daher die gestellten Bedingungen besonders gut erfüllen. Der Seilmodul  $M$  beträgt hier nur etwa 0,6 bis 1 kN, so dass bei einem Sturz aus 10 m ( $f = 1$ ) der Fangstoß etwa 2,2 kN und der Bremsweg 27 m [6] betragen. Diese Werte erscheinen zunächst ideal. Bedenkt man jedoch, dass bei dem langen Bremsweg und dem nachträglichen Ausschlagen des Kletterers die Gefahr zunimmt, gegen den Felsen zu schlagen, so werden die Nachteile dieses Seils für das Sichern beim Klettern deutlich. Gegenüber Seilen zum Bungeespringen müssen Kletterseile einen größeren Seilmodul sowie eine weit größere Dämpfung aufweisen.

### **Dynamische Sicherung**

Ist das Seil nicht starr am Berg verknotet, sondern wird über eine Bremsvorrichtung ein gewisser Seildurchlauf ermöglicht, so ergibt sich dadurch eine Bremswegverlängerung. Dies führt zu einem deutlich herabgesetzten Fangstoß.

Die erste dynamische Seilbremse wurde von Fritz Sticht erfunden und 1968 in München vorgestellt, sie ist unter dem Namen „Stichtplatte“ immer noch in Gebrauch. Sie entspricht aber nicht mehr den heutigen Anforderungen an eine dynamische Sicherung im Hinblick auf ihre Handhabbarkeit. Die derzeit gebräuchlichste Sicherung ist die Halbmastwurfsicherung (Abb. 7a). Eine weitere Sicherung, der sogenannte „Achter“ (Abb. 7b), hat sich eher im Klettersport durchgesetzt. Daneben werden auch noch andere Vorrichtungen zur dynamischen Sicherung angeboten.

Das Prinzip der dynamischen Sicherung ist einfach. Durch starke bzw. mehrfache Seilumlenkungen, durch die ein großer Reibungswiderstand auftritt, wird bei geringem Zug ein automatisches Festhalten des Seils erreicht, das ab einer bestimmten Zugkraft in einen gebremsten Durchlauf

übergeht. Untersuchungen des Deutschen Alpenvereins im Jahr 1996 am Kletterturm in Böckingen [7] zeigten, dass unter den angebotenen dynamischen Sicherungsvorrichtungen die Halbmastwurfsicherung (Abb. 7a) die größte Bremskraft aufweist (2,5 - 4 kN). Bei anderen Sicherungen wird der dynamische Effekt der Sicherung auf Kosten der Bremskraft überbetont. Der damit verbundene größere Bremsweg kann bei schweren Stürzen sowohl für den Stürzenden als auch für den Sichernden (Verbrennungsgefahr der Hände) gefährlich sein.



**Abb. 7:** Seilführung in Karbinern zur Verstärkung der Bremswirkung durch Reibung: 7a (links) Halbmastwurf; 7b (rechts) Achter.

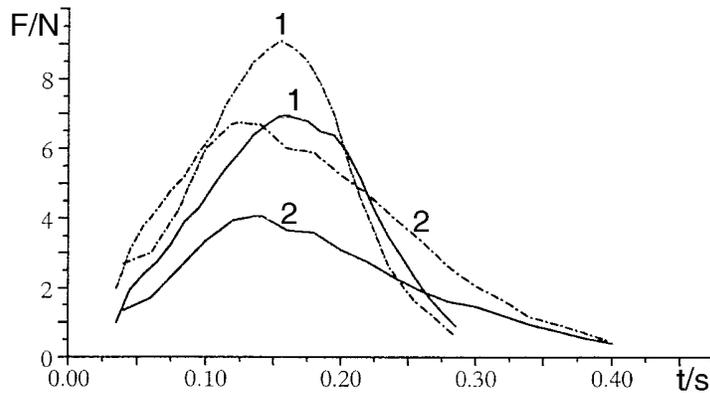
Abbildung 8 zeigt die charakteristischen Unterschiede in der Zeit-Kraft-Abhängigkeit zwischen einem statisch und einem dynamisch aufgefangenen Sturz [8]. Der Unterschied zwischen den Kräften auf der Seite der Sicherung und der Seite des Sturzwichts ergibt sich aus der Reibung an der Umlenkvorrichtung. Die dynamische Sicherung führt zu einer Reduzierung des Fangstoßes von 9kN auf 7kN. Außerdem wird die Bremsphase dadurch um etwas 30% verlängert.

### Seilreibung

Die Bremswirkung einer Seilumlenkung um eine runde Kante ist durch folgende Beziehung gegeben:  $F(\alpha) = F_0 \cdot e^{-\mu \cdot \alpha}$

wobei  $F_0$  die in Gleitrichtung des Seiles wirkende Zugspannung vor der Umlenkung und  $F$  die

Zugspannung danach ist ( $F < F_0$ ).  $\mu$  ist der Reibungskoeffizient und  $\alpha$  der Winkel, um den das Seil umgelenkt wird (siehe Kasten 2).

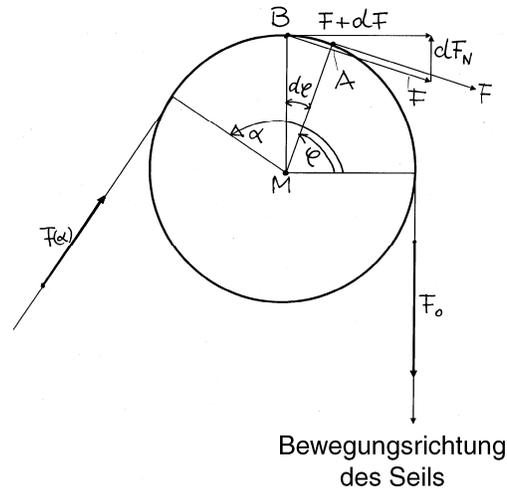


**Abb. 8:** Messung des Kraftverlaufs bei einem Sturz eines starren Fallgewichts über eine Umlenkkante. Kurve 1: statisch abgefangener Sturz; Kurven 2: dynamisch abgefangener Sturz. Die strichpunktier-ten Linien geben den Kraftverlauf auf Seite des Sturzwichts, die durchgezogene Linie jenen auf Seite der Sicherung an. In beiden Fällen ist die auf die Sicherung wirkende Kraft durch die Reibung an der Umlenkkante verkleinert.

In die Ableitung der Formel geht stillschweigend ein, dass das Seil sehr dünn im Vergleich zum Umlenkradius ist und dass es nicht gequetscht wird. Vergleicht man den Radius eines Karabinerschenkels mit einem Seildurchmesser (beide etwa 0,5 cm), so sieht man, dass diese Voraussetzungen nicht zutreffen. Messungen eines der Autoren (P.D.) am Seilsturzstand der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der Technischen Universität Wien ergaben [8], dass der Reibungskoeffizient  $\mu$  während der Phase des Abbremsens annähernd konstant ist und bei dynamischen Sturzversuchen einen Wert von  $\mu = 0,2$  hat. Wird das Seil durch eine Sicherung mittels Seilumlenkung gebremst, so wird die entsprechende Energie auch an dieser Stelle umgesetzt. Dadurch werden Seil und Sicherung stark erwärmt, was zu Schäden am Seil führen kann [9].

### Haken, Keile und „Friends“

Ähnlich wichtig wie das Seil ist dessen Befestigung am Fels. Hierzu werden spezielle Werkzeuge (Haken, Karabiner,...) eingesetzt, die aus bruchfestem Material (Stahl oder Aluminiumlegierungen) gefertigt werden. Als Schwachstelle tritt damit nur noch die Art der Fixierung am Fels auf. Die klassische Seilbefestigung erfolgt mittels Haken: Man verwendet entweder bereits am Fels angebrachte Haken oder schlägt neue in den Felsen (direkt oder in gebohrte Löcher). Bei Haken, die sich bereits längere Zeit im Fels befinden, besteht die Gefahr, dass entweder das Material korrodiert ist oder dass durch Verwitterung des Gesteins der Haken nicht mehr ausreichend fest sitzt. Als Ergänzung oder Alternative setzen sich verstärkt mobile Sicherungsmittel (z.B. Klemmkeile) durch (Abb. 9).

**Kasten 2:****Umlenkreibung**

Ein über die kreisförmige Umlenkvorrichtung gleitendes Seil wird um den Winkel  $\alpha$  gegen den Uhrzeigersinn umgelenkt (siehe Abbildung). Dabei ist die vor der Umlenkung in Bewegungsrichtung des Seils wirkende Zugkraft  $F_0$  größer als die Zugkraft  $F(\alpha)$  nach der Umlenkung. Die zur Umlenkung benutzte Vorrichtung überträgt auf das Seil die Reibungskraft  $F_R = F(\alpha) - F_0$ . Diese Reibungskraft ist negativ, weil sie gegen die Bewegungsrichtung des Seils wirkt. Betrachtet werde nun ein infinitesimal kleines Stück des Seils, längs dessen sich die Zugkraft um den Winkel  $d\varphi$  vom Angriffspunkt A nach B dreht (siehe Abbildung, an den Kraftpfeilen sind die Beträge der Kräfte angegeben). Die Zugkraft im Seil hat zunächst in A den Betrag  $F$  und danach in B den Betrag  $F + dF$ , wobei der von der Reibung stammende Beitrag  $dF$ , negativ ist. Die beiden Zugkräfte sind jeweils tangential zur Umlenkvorrichtung. Die Drehung wird bewirkt durch die Zusatzkraft  $dF_N$  die senkrecht zu  $F + dF$  angenommen wird. Sie ist die Reaktion der Umlenkvorrichtung auf die Anpressung des Seiles, also die Normalkraft für das Bogenstück  $d\varphi$ . Der Figur entnimmt man die für kleine Winkel gültige Näherung  $dF_N = F \sin d\varphi \approx F d\varphi$  für den Betrag dieser Normalkraft. Ist die Reibungskonstante  $\mu$ , so folgt  $dF = -\mu \cdot dF_N = -\mu \cdot F \cdot d\varphi$ . Das Minuszeichen begründet sich daraus, dass die Reibungskraft den Betrag der Zugkraft im Seil mindert.

Integriert man  $dF = -\mu \cdot F \cdot d\varphi$  über den Winkel  $\alpha$  und berücksichtigt dabei die Anfangsbedingung  $F(0) = F_0$ , so erhält man  $F(\alpha) = F_0 \cdot e^{-\mu\alpha}$ .



**Abb. 9:** Klemmkeile unterschiedlicher Größe

Klemmkeile werden in verschiedenen Größen mitgeführt und können damit an die im Fels vorliegenden Spaltbreiten angepasst werden. Diese Keile können leicht gelegt und wieder entfernt werden, sie beschädigen den Fels nicht und können beliebig oft verwendet werden. Allerdings gilt die Einschränkung, dass sie nur in einem sich nach unten bzw. nach außen verengenden Riss ihre Klemmwirkung zeigen.



**Abb.10:** Beispiel für einen Friend als Befestigungshilfe in einem Spalt. Hier ist gezeigt, dass ein Friend sogar in einer nach unten sich öffnenden Spalte eine Klemmwirkung zeigt. Diese Art der Befestigung sollte allerdings beim Klettern aus Sicherheitsgründen vermieden werden.

Dieser Nachteil tritt bei den neu entwickelten, flexibel einsetzbaren Klemmgeräten, den sogenannten Friends (Begriff aus dem Milieu der Kletterer, Einführung 1977 durch Ray Jardine, siehe auch <http://de.wikipedia.org/wiki/Friend>), nicht mehr auf. Diese können auch in sich nach außen öffnenden Rissen plaziert werden. Abb. 10 zeigt einen Friend mit vier Segmenten, die um eine Achse drehbar gelagert sind. Das diesem Klemmgerät zugrunde liegende Prinzip wird von Kletterern schon lange beim Verspreizen in einem Kamin verwendet: Die Zugkraft nach unten bewirkt, dass die Segmente nach außen gedrückt werden und sich auch aufgrund ihrer gezahnten

Außenseite am Fels verankern. Die Berechnung der hierbei auftretenden Kräfte (siehe Kasten 3) zeigt, dass der Winkel  $\varphi$  zwischen Auflagepunkt und Achse nur in einem kleinen Bereich, etwa  $10^\circ < \varphi < 20^\circ$ , liegen darf. Der optimale Winkel sollte außerdem bei unterschiedlich breiten Rissen annähernd derselbe sein. Dies wird dadurch erreicht, dass die äußere Oberfläche eines Friends die Form einer logarithmischen Spirale besitzt. Die Begründung hierfür ist im Kasten 3 zu finden.

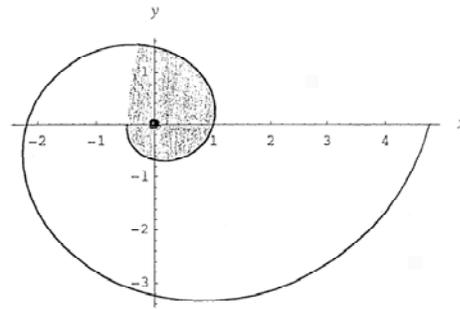
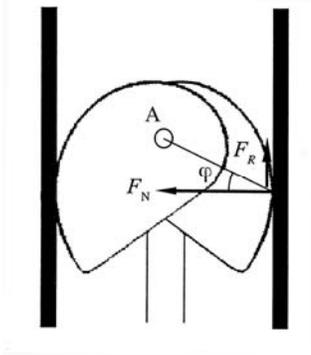
## 7. „Kleben“ an der Wand

Liegt ein Körper auf einer schiefen Ebene, so zeigen einfache Betrachtungen, dass der Körper dann nicht rutscht, wenn der Tangens des Neigungswinkels  $\varphi$  kleiner ist als der Reibungskoeffizient  $\mu$ , d.h.  $\tan \varphi < \mu$ .

Dies gilt genauso für einen Kletterer, der auf einer schrägen Wand nach oben gehen will. Typische Werte des Reibungskoeffizienten  $\mu$  für Kletterschuhe sind ca. 1,2 auf glattem Fels.

Man kann damit eine Wand in einem Winkel von  $50^\circ$  hochgehen. Der große Reibungskoeffizient wird durch spezielle Gummimaterialien erreicht, deren genaue Zusammensetzung Betriebsgeheimnis der Kletterschuhproduzenten ist.

Eine unerfahrene Person wird sich bei einem solchen Gefälle nicht wohl fühlen, und sie wird sich instinktiv näher zum „sicheren“ Felsen neigen. Diese psychologisch verständliche Reaktion ist aber aus physikalischer Sicht falsch: Wenn sich der Kletterer nach vorne neigt und sich dabei mit den Händen am Fels abstützt, vermindert er die auf die Klettersolen wirkende Gewichtskraft und damit die Normalkraft und die Haftreibung. Auch wenn er sich nicht am Boden abstützt, bewirkt die Neigung nach vorne bereits eine ungleichmäßige Verteilung des Gewichts auf die Sohlen: Der Ballenbereich wird stärker belastet als der Fersenbereich, die auf den Boden angedrückte Fläche der Kletterschuhe verringert sich, und dies führt, auch bei gleich bleibender Normalkraft, zu einer Verminderung der Haftreibung. Eine alte Bergsteigerregel besagt deshalb: Weg vom Fels! Eiskletterer erzeugen noch eher den Eindruck an einer - manchmal senkrechten - Wand zu kleben. Hier werden allerdings Steigeisen mit Zacken (üblicherweise 10 Vertikalzacken an den Sohlen und 2 Frontalzacken vorne) sowie ein oder zwei Eispickel verwendet. Die Zacken werden in das Eis geschlagen und ermöglichen so eine Kraftausübung in vertikale Richtung. Steigeisen und Pickel bieten einen guten Halt bei Eis- und Schneewänden.

**Kasten 3: Friends**

Betrachtet man ein Segment eines Friends (Abb. links), so muss im Gleichgewichtsfall die Resultierende aus Reibungskraft  $F_R$  und Normalkraft  $F_N$  vom Auflagepunkt zur Drehachse weisen, weil das Drehmoment dann verschwindet. Daraus folgt für die Beträge der Kräfte:  $F_R = \tan(\varphi)F_N$

Die Haftreibung  $F_R$  besitzt eine obere Grenze, die durch  $F_R \leq \mu \cdot F_N$  gegeben ist. Aus beiden Beziehungen folgt die Bedingung  $\tan \varphi \leq \mu$ .

Ist der Winkel  $\varphi$  größer als durch diese Ungleichung erlaubt, so rutscht der Friend, weil die Normalkraft zu gering ist. Die Reibungskraft zwischen Stahl und Stein (Aluminium und Granit) liegt etwa bei  $\mu = 0,4$  ( $\mu = 0,3$ ), so dass  $\varphi < 22^\circ$  ( $\varphi < 17^\circ$ ) sein muss.

Es gibt aber auch eine Untergrenze für den Winkel. Für kleine Winkel wird die Normalkraft so groß, dass eine zu große Schubspannung  $\tau$  zwischen den Segmenten in der Achse auftreten kann. Für die Schubspannung  $\tau$  gilt:

$$\tau = \text{Normalkraft} / \text{Querschnittsfläche der Achse} = F_N / A = F_R / (A \cdot \tan \varphi) \text{ bzw. } \tan \varphi = F_R / (\tau \cdot A).$$

Hochfester Stahl erträgt eine Schubspannung von bis zu  $\tau < 900 \text{ N/mm}^2$ , die Achse hat einen Durchmesser von etwa 4 mm und als maximale Reibungskraft nehmen wir  $F_R = 2,5 \text{ kN}$  (10 kN auf 4 Segmente). Dies ergibt einen unteren Grenzwinkel von  $\varphi > 12^\circ$ .

Der optimale Winkel liegt also im Bereich zwischen  $12^\circ$  und  $22^\circ$  und soll für schmalere und breitere Spalten gleichermaßen zur Anwendung kommen, d.h. die Tangente soll an jeder Stelle der Oberfläche denselben Winkel mit dem entsprechenden Radiusvektor (Verbindungsline Achse - Berührungspunkt) einschließen. Eine solche Bedingung wird durch eine logarithmische Spirale der Form

$$r = r_0 \cdot e^{\alpha \cdot \tan \varphi}$$

erfüllt. Die Abbildung oben rechts zeigt eine solche logarithmische Spirale mit  $r_0 = 1$  und  $\varphi = 14^\circ$ .

Der graue Bereich zeigt die Form eines Segments für den Friend.

Verliert man diesen Halt, wird es allerdings sehr kritisch: Der Sicherheitskreis des Deutschen Alpenvereins hat experimentell ermittelte Werte für Reibungskoeffizienten von Personen auf Eis- und Schneeflächen veröffentlicht [1]:

Bei Eis und hartem Schnee ergibt sich unabhängig von der Kleidung  $\mu = 0,03$ , bei weicherem Schnee mit Perlonbekleidung  $\mu = 0,2$  und mit normaler Bekleidung  $\mu = 0,3$ . Dies bedingt, dass bei hartem Schnee die Rutschgeschwindigkeit bei einer Hangneigung von etwa  $40^\circ$  auf mehr als 90 % der Geschwindigkeit des freien Falls steigt, bei weichem Schnee und Normalkleidung und einer Hangneigung von  $30^\circ$  steigt sie auch immer noch auf mehr als die Hälfte der Fallgeschwindigkeit. Diese Eigenschaft bekommen auch Schifahrer manchmal schmerzlich zu spüren.

### **Zusammenfassung**

Es wurde an einigen Beispielen gezeigt, dass das Thema Klettern, wie andere Themen aus dem Sport, eine Reihe von Anknüpfungspunkten zur Physik bietet. Es sind dies hier: Flaschenzüge, Hebel, Reibung und Umlenkreibung, Energiebetrachtungen, Materialkonstanten der Seile, Hookesches Gesetz, Klemmen über Keile und Friends und einfach begründbare Gesetzmäßigkeiten zum Klettern und seine Gefahren. Diese Berührungspunkte zur Physik können einmal einem Kletterbegeisterten persönlich beim Abschätzen von Möglichkeiten und Gefahren dieser begeisterten Sportart helfen, zum anderen können sie aber auch dazu dienen über die Begeisterung und dem Interesse an dieser speziellen Sportart einen Weg in schulrelevante physikalische Themen zu bieten. Dieser Weg ist sicher wirklichkeitsnäher als über die allzu bereinigten Demonstrationsobjekte wie sie in der Regel im Physikunterricht verwendet werden.

### **Literatur**

[1] P. Schubert, Tätigkeitsbericht des Sicherheitskreises im Deutschen Alpenverein 1980-83: Sicherheit in Firn und Eis, München (1984).

[2] Themenheft "Hebel und Rolle", Naturwissenschaften im Unterricht, Heft 23 (1994).

[3] P. Dietmaier, Inst. f. Mechanik, Techn. Univ. Graz, private Mitteilung.

[4] H. Mägdefrau, Die Belastung des menschlichen Körpers beim Sturz ins Seil und deren Folgen, Dissertation, Fak. Biologie, Ludwig-Maximilians-Universität München (1989).

[5] R. Reali, L. Stefanini, Eur. J. Phys. 17, 348 (1996).

[6] B. Freytag, Bungeejumping, Praxis der Naturwissenschaften 5/48.Jg. (1999), 40; P.G. Menz , The Physics of Bungee Jumping, The Physics Teacher 31 (1993), 483; R. Hirner, Fa. Bungy-Jumping, Graz, private Mitteilung.

[7] T. Czermin, Physikdidaktische Aspekte des Kletterns, Staatsexamensarbeit, Physikalisches Institut der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1996).

[8] P. Dullnig, Physikalische Aspekte beim Bergsteigen und Klettern, Diplomarbeit, Inst. f. Theor. Physik, Univ. Graz (1996).

[9] M.J.M. Leask, G.C. Sills, Eur. J. Phys. 18, 247 (1997).

**Anschriften:**

StRin Tina Gebhardt, geb. Czermin, Greutweg 13, 82441 Ohlstadt ([tina.ohlstadt@t-online.de](mailto:tina.ohlstadt@t-online.de))

Mag. Peter Dullnig, Lofererstr. 4, A-5760 Saalfelden ( [peter.dullnig@sbg.at](mailto:peter.dullnig@sbg.at) )

Prof. Dr. Leopold Mathelitsch, Karl-Franzens-Universität Graz,

Institut für Physik, Universitätsplatz 5, A-8010 Graz

([leopold.mathelitsch@uni-graz.at](mailto:leopold.mathelitsch@uni-graz.at) )

Prof. Dr. Werner B. Schneider, Aurachweg 26, D – 91056 Erlangen

( [werner.schneider@solstice.de](mailto:werner.schneider@solstice.de) )

**Bildnachweis:** Fotos und Zeichnungen: Tina Gebhardt, Ohlstadt

**Anmerkung:** Mehr über Klettern und praktische Übungen z.B. in der Berg- und Skitourenschnule

Gebhardt&Bach, Ohlstadt: [www.bergahoi.de](http://www.bergahoi.de)