

## Erkenntnisse aus der Curlingvorlesung an der Uni Essen bei Prof. Wolf am 7.12.2006

Zwei Phänomene, die beim Curling auftreten, sollen untersucht werden:

- 1.) Der Curlingstein fährt eine Kurve und zwar in die Richtung, in die er sich dreht.
- 2.) Die Rotationsbewegung (= Drehung des Steins) und Translationsbewegung (= Vorwärtsfahren des Steins) hören immer gleichzeitig auf.

zu 1.) Die Beobachtung: Der Curlingstein fährt eine Kurve und zwar in die Richtung, in die er sich dreht.

Eine ähnliche Kurvenfahrt machen auch Gegenstände wie Gläser oder Metallzylinder auf dem Tisch oder ein Papierkorb auf dem Boden, wenn sie angedreht und weggestoßen werden. Allerdings fahren diese Gegenstände eine Kurve in die entgegengesetzte Richtung als beim Curling. Diese Versuche auf trockenen Oberflächen lassen sich so erklären: An der Kontaktfläche von Gegenstand und Unterlage wirkt die Reibungskraft  $\vec{F}$ . Da sie den Gegenstand bremst ist ihre Richtung entgegengesetzt zur Richtung der Geschwindigkeit  $\vec{v}$ . Durch diese Kraft ergibt sich nun ein Drehmoment. Der Hebelarm  $\vec{r}$  reicht dabei vom Schwerpunkt S des Gegenstandes bis zum Angriffspunkt der Kraft (siehe Abbildung 1).

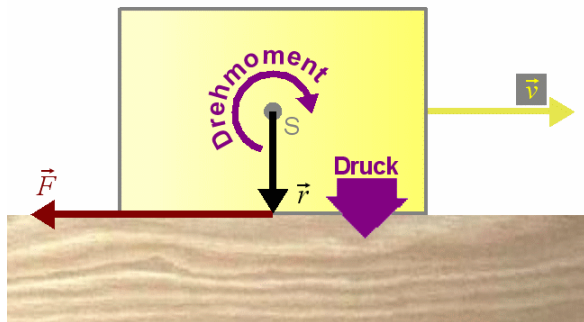


Abbildung 1: Ein Zylinder gleitet auf einem Tisch (Seitenansicht). Die Reibungskraft erzeugt ein Drehmoment.

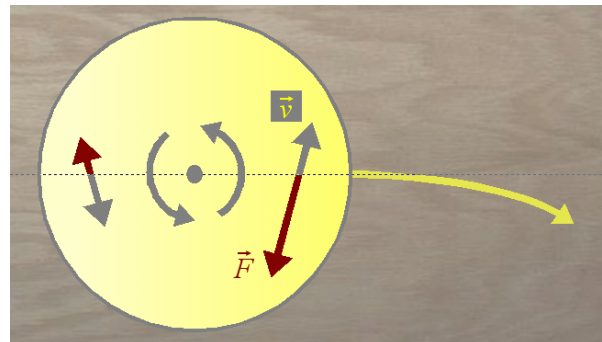


Abbildung 2: Ein gleitender rotierender Zylinder auf einem Tisch (Draufsicht). Die Reibungskraft im vorderen Bereich ist größer als im hinteren Bereich und verursacht eine Kurvenfahrt entgegengesetzt zur Drehrichtung.

Das aus Hebelarm und Reibungskraft entstehende Drehmoment versucht den Körper um die Querachse, die durch den Schwerpunkt S läuft zu drehen. Der Gegenstand droht in Fahrtrichtung vorne überzufallen. Dieses Phänomen sieht man auch, wenn man auf einer Bartheke ein hohes, schmales Glas Bier stark anschiebt – denn manchmal fällt dieses dann genauso vorne über. So entsteht also *an der Vorderseite ein höherer Druck* auf die Unterlage als an der Rückseite. Damit ist auch die Andruckkraft vorne größer. Da die Reibungskraft mit steigender Andruckkraft zunimmt, ist die *Reibungskraft vorne nun größer als hinten*. Schaut man sich diese Situation nun von oben an (siehe Abbildung 2), dann sieht man, dass die Reibungskräfte für eine Rechtskurve überwiegen. Alle Reibungskräfte zeigen dabei auch nach hinten, wodurch die Vorwärtsbewegung abgebremst wird.

Warum beim Curling die Kurvenrichtung genau umgekehrt ist, ist noch nicht endgültig geklärt. Man geht davon aus, dass hier logischer Weise die *Reibung im vorderen Bereich kleiner* als im hinteren Bereich des Steins sein muss (siehe Abbildung 4). Der Grund dafür ist aber noch unklar. Eine mögliche Erklärung ist „Aquaplaning“. Denn Eis ist bei Temperaturen über ca.  $-30\text{ °C}$  immer von einer mikroskopisch dünnen Wasserschicht umschlossen. Das liegt daran, dass der direkte Kontakt von Eis und Luft, die Wasserdampf enthält, mehr Energie kostet, als die beiden Kontaktflächen zwischen Eis und Wasser gefolgt von Wasser und Wasserdampf. Da die Natur die Gesamtenergie immer möglichst klein halten will, benetzt also eine sehr dünne Wasserschicht das Eis. Bei noch tieferen Temperaturen ist das allerdings nicht der Fall, so dass beispielsweise in der Antarktis unpräparierte Skier bei extrem tiefen Temperaturen schlecht gleiten. Denn dieser Wasserfilm ist beim Skifahren oder Schlittschuhlaufen der Grund für das gute Vorwärtstkommen.

(Anmerkung: Früher dachte man, dass beim Schlittschuhlaufen der Druck, den man mit den Kufen aufs Eis bringt das Eis schmilzt und man dann auf diesem Wasserfilm fährt. Heute weiß man aber, dass dieser Druck viel zu klein ist, um das Eis zu schmelzen. Ein Schlittschuhläufer müsste über eine Tonne wiegen, damit das Eis unter ihm schmilzt.)

Die Vermutung ist nun, dass der Curlingstein im vorderen Bereich auf dem ungestörten und damit dicken Wasserfilm fährt, während der hintere Teil des Steines, der über die schon benutzten Stellen fährt, einen dünneren Wasserfilm unter sich hat. Der Stein schwimmt also wie ein Auto, das eine Pfütze erreicht, vorne stark auf. Die Hinterräder fahren dann durch die Spur der Vorderräder, die das Wasser schon etwas verdrängt haben. So hat der Stein im hinteren Teil stärkeren Eiskontakt und damit eine stärkere Reibung als im vorderen Teil. Die resultierende Reibungskraft bewirkt deshalb die Kurvenfahrt in Richtung der Drehung.

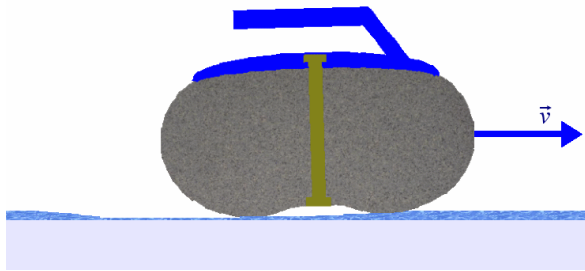


Abbildung 3: gleitender Curlingstein auf Eis (Seitenansicht, Querschnitt) – Eine mikroskopisch dünne Wasserschicht (hier übertrieben dick dargestellt) verursacht Aquaplaning.

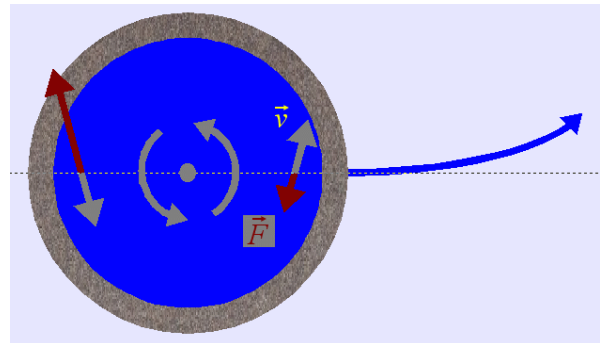


Abbildung 4: gleitender Curlingstein auf Eis (Draufsicht) – Die Reibungskraft vorne ist schwächer als hinten, deshalb ist die Kurve umgekehrt zum trockenen Gleiten.

zu 1.) Die Beobachtung: Es kommt beim Curling nicht vor, dass bei einem Stein die Translation beendet ist, während die Rotation noch besteht, also dass er steht und sich dann noch lange auf der Stelle dreht. Genauso wenig sieht man Steine, die ihre Rotation beenden und dann noch weiterfahren. Die Beobachtungen stimmen zumindest, wenn der Stein keinen Dreck fängt.

Die Folgerung, die man aus diesen Beobachtungen zieht, ist, dass Rotation und Translation sich beim Curling gegenseitig beeinflussen, also aneinander gekoppelt sind. Das was diese beiden Bewegungsarten koppelt ist die Reibung, die an der Kontaktfläche von Granit und Eis auftritt.

Um dem Rätsel auf die Spur zu kommen, muss man also diese Reibung etwas näher untersuchen. Nun sind den Physikern sehr viele verschiedene Reibungsarten bekannt. Die drei großen Kategorien sind Haftreibung, Gleitreibung und Rollreibung. Hier soll es vor allem um die Gleitreibung gehen, aber die Haftreibung gibt es natürlich beim Curling auch, nämlich wenn der Stein sich nicht bewegt:

### Exkurs Haftreibung:

Wenn man gegen den Stein drückt oder ihn zieht, dann übt man eine Kraft auf ihn aus. Trotzdem bewegt er sich nicht sofort, sondern steht noch. In diesem Fall entsteht die Haftreibungskraft, die genauso stark ist, wie die Kraft mit der man drückt, aber ihr genau entgegengesetzt ist, so dass sich nichts rührt. Die Haftreibungskraft wächst aber nicht ohne Ende – bei einem bestimmten Wert ist Schluss. Wenn man dann stärker drückt, wird die Kraft mit der man drückt größer als die Haftreibungskraft, die schon am Limit ist und der Stein bewegt sich. Während der gesamten Steinfahrt gibt es dann die Haftreibung gar nicht mehr, sondern nur die Gleitreibung.

Die dritte Kategorie, nämlich Rollreibung gibt's beim Curling gar nicht, es sei denn, man würde einen Stein auf die Seite kippen und rollen. Aber das macht man ja nicht.

Auch wenn man sich nun auf die Gleitreibung beschränkt, gibt es ganz unterschiedliche Arten davon, die hier kurz erwähnt werden müssen, damit man die Curlingreibung später einordnen kann. Man unterscheidet die Gleitreibungskräfte unter anderem danach, wie stark die Reibungskraft von der Geschwindigkeit der Bewegung abhängt. Je nach Situation tritt eine andere Form der Gleitreibung auf. Hier einige Beispiele:

A) Lässt man einen Holzklötz auf einem schräg gestellten Tisch herunter gleiten, dann ist die Gleitreibungskraft zwar um so stärker, je stärker die Kraft ist, mit der er gegen den Tisch drückt, aber es ist ganz egal wie schnell er rutscht. Das heißt, die Reibungskraft ist **unabhängig** von der Geschwindigkeit des Klotzes. Mathematisch ausgedrückt schreibt man das so:

$F \sim v^0$  (in Worten: „Die Reibungskraft  $F$  ist proportional zur Geschwindigkeit  $v$  hoch Null.“)  
(Diese Reibung nennt man trockene Reibung oder Festkörperreibung oder Coulomb-Reibung.)

B) Nimmt man ein Glas Honig und lässt eine Kugel hineinfallen, dann reibt sich die Kugel am Honig. Ähnlich ist die Situation bei einem Fallschirmspringer mit geöffnetem Schirm, der sich an der Luft reibt. Die Reibungskraft ist in beiden Fällen **proportional** zur Fallgeschwindigkeit. Das bedeutet nicht nur, dass die Reibung zunimmt, wenn das Objekt schneller wird, sondern sagt auch, um wie viel sie zunimmt. Nämlich: Wenn man die Geschwindigkeit um einen festen Wert erhöht, steigt die Reibungskraft auch um einen festen Wert, und zwar egal, welche Geschwindigkeit das Objekt gerade hat. Das schreibt man mathematisch so auf:

$F \sim v^1$  (in Worten: „Die Reibungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit.“)

(Diese Reibung, bei der keine Verwirbelungen im Medium – hier Honig bzw. langsam strömende Luft – auftreten, nennt man Stokes-Reibung.)

C) Fährt man dagegen schnell mit dem Auto, so reibt sich der Wagen an der Luft und es entstehen Verwirbelungen im Medium Luft. Auch beim Sprung vom Zehn-Meter-Brett ist das so. In beiden Situationen hat die Geschwindigkeit einen viel größeren Einfluss auf die Reibungskraft, als in den vorher genannten Beispielen. Hier wächst die Kraft **überproportional** stark an – nämlich mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Erhöht man hier die Geschwindigkeit um einen festen Wert, dann erhöht sich die Reibungskraft um einen variablen Wert – und zwar ist dieser Zuwachs um so größer, je größer die aktuelle Geschwindigkeit ist. Mathematisch geschrieben:

$F \sim v^2$  (in Worten: „Die Reibungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit hoch 2.“)

D) Es gibt viele weitere Reibungsarten, bei denen die Reibung eine andere Abhängigkeit von der Geschwindigkeit hat. Die Hochzahl kann dabei auch eine Kommazahl sein, z.B.:

$F \sim v^{1,5}$ .

Die theoretischen Physiker haben nun herausgefunden, dass grundsätzlich 5 verschiedene Fälle eintreten können und sie haben die Fälle voneinander abgegrenzt. Diese Bereiche sind in Abbildung 5 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Hochzahl der Geschwindigkeit aufgetragen. Für die Beispiele A bis D ist das 0 bzw. 1 bzw. 2 bzw. 1,5. Weiter rechts in der Abbildung sind also Situationen mit stärkerer Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit. Ganz links sind Fälle, in denen keine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit da ist (wie in Beispiel A).

Auf der y-Achse ist das so genannte Trägheitsmoment des sich bewegenden Objektes aufgetragen. Das ist Folgendes: Ein Objekt lässt sich je nach Form und interner Gewichtsverteilung mit viel oder wenig Energie in Rotation versetzen. Hier sind nun weiter oben auf der y-Achse Objekte, die schwer in Rotation zu versetzen sind und weiter unten Objekte, bei denen das leicht geht.

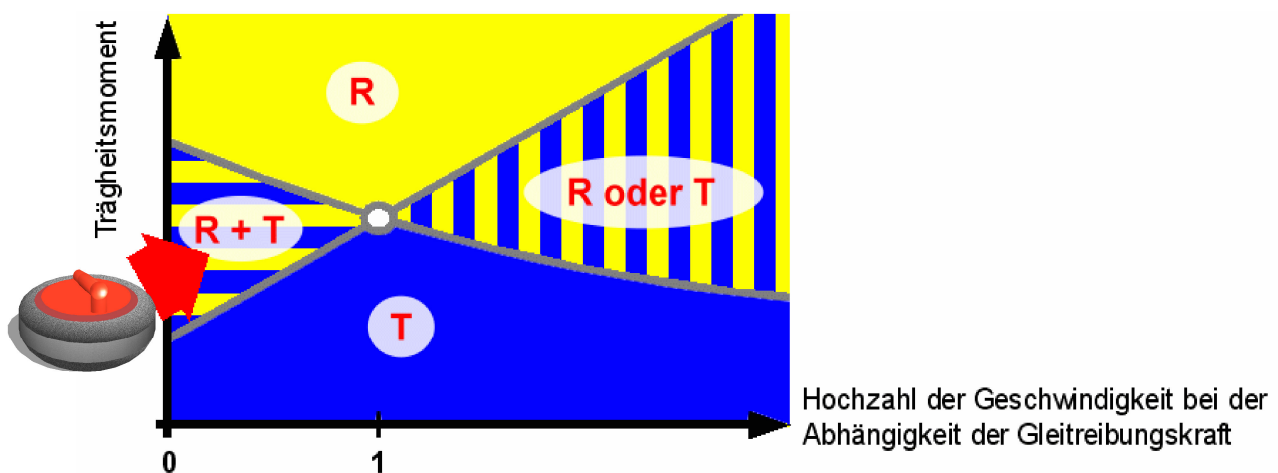


Abbildung 5: Zuordnung von Trägheitsmoment und Art der Reibungskraft zu den Bewegungsarten Rotation und Translation

Im Bereich „R“ sind Systeme, die nur rotieren können, aber keine Translation machen, wie beispielsweise ein Kreisel. Umgekehrtes gilt für den Bereich „T“, wobei es wohl technisch schwer zu realisieren ist, dass ein Gegenstand keine Rotation, sondern nur eine Vorwärtsfahrt machen kann. Im Bereich „R oder T“ hängt es von den Anfangsbedingungen ab, ob die Rotation oder die Translation nach kurzer Zeit aufhört und nur die andere Bewegungsform übrig bleibt. Im Schnittpunkt der 4 Bereiche ist ein kleiner Bereich, in dem Rotation und Translation unabhängig voneinander sind. In der Vorlesung haben wir theoretisch hergeleitet, dass in dieser Situation (Reibungskraft proportional zu Geschwindigkeit und als Objekt ein rotierender Zylinder) die beiden Bewegungsformen separat voneinander ablaufen. So endet jede zu einem anderen Zeitpunkt. Nur zufällig kann es vorkommen, dass beide gleichzeitig stoppen. Im Bereich „R+T“ liegt nun irgendwo das Curlingspiel. Die Reibung ist beim Curling also unterproportional, da die Hochzahl kleiner als 1 ist und Rotation und Translation sind beide gleichzeitig vorhanden und aneinander gekoppelt. Die unterproportionale Abhängigkeit der Reibungskraft bedeutet: Je kleiner die Geschwindigkeit des Steines wird, desto größer ist die Abnahme der Reibungskraft. Die Reibung wird also gegen Ende der Steinfahrt immer schneller kleiner und bremst den Stein immer weniger.

Zugabe (weitere Erkenntnisse):

- Die Kurvenfahrt gibt es beim Curling genauso auch auf ungepebbeltem Eis. Das hat eine kanadische Forschergruppe herausgefunden, die mit den Physikern aus Essen auf diesem Gebiet zusammenarbeitet. Die Pebbels scheinen also keine Rolle für die Kurvenfahrt zu spielen.
- Ein überholter Erklärungsansatz für die Kurvenfahrt war, dass wie bei den Versuchen auf dem trockenen Tisch das Drehmoment einen stärkeren Druck auf das Eis unter dem vorderen Teil des Steins ausübt, der das Eis schmilzt. Aber hierbei ist der Druck ebenso wie beim Schlittschuhläufer viel zu klein.
- Eine Erklärung für die langsame Geschwindigkeit der Steine nach dem Pebbeln und das danach immer schneller werdende Eis wurde diskutiert. Es könnte sein, dass der Wasserfilm, der die gesamte Eisoberfläche benetzt, an den Seiten der Pebbels durch die Schwerkraft etwas herunterläuft. Grundsätzlich wird er durch atomare Kräfte auch oben auf den Pebbels gehalten, so dass keine Löcher im Wasserfilm entstehen. Das liegt daran, dass die atomaren Kräfte stärker sind, als die Gravitation. Trotzdem könnte die Schwerkraft den Film etwas herunterziehen, so dass er oben auf den Pebbels dünner und unten in den Eisvertiefungen dicker ist. Die ersten Steine fahren dann auf dünnem Wasserfilm und spüren eine starke Reibung. Wenn die Pebbels abgenutzt sind, dann fahren die Steine auf dem etwas dickeren Wasserfilm und die Gleitreibung wird geringer.

Fazit: Es bleibt noch Einiges auf diesem Gebiet zu erforschen.

Miro