

Die Physik des Golfspiels

Au weia, Physik habe ich schon in der Schule gehasst, mag nun mancher denken. Keine Angst, ich will hier nicht mit Formeln um mich werfen. Aber als Physiker ist es mir ein Anliegen, dass jeder Golfspieler und jede Golfspielerin wenigstens ein bisschen versteht, welche Prinzipien bei ihrem so geliebten Sport denn dahinterstehen. Im Zweifel hilft das sogar, manchen Fehler selbst zu bemerken und auszumerzen. Es braucht nur eine Viertelstunde (na ja, vielleicht auch eine halbe, mit Einwirkungszeit), um hier mal durchzugehen. Und es verändert euer Golferleben. Beides, Golf-Erleben und Golfer-Leben.

Über die Physik des Golfspiels gibt es ganze Bücher. Wer sich für das Thema interessiert, darf sich dort gerne ausführlich informieren. Beispiele (ohne Wertung, ich habe mich da nicht durchgelesen, sondern nur reingeschnuppert):

Physik des Golfspiels: Mit Newton zum Tee, von Eván Egry (2014),

The Physics of Golf, von Theodore Jorgensen (2. Ausgabe 1999),

The Science of Golf, von John Wesson (2011)

Außerdem gibt es auch diverse kürzere Abhandlungen im Internet. Selbstgemacht ist aber immer besser.

Hier will ich nur das Wichtigste kurz und knapp abhandeln. Folgende Themen kommen zur Sprache:

Der elastische Stoß

Der Ballflug

Die Schlagtechnik

Die Schlägertechnik (ein kleiner Teil)

Noch eine Anmerkung: im Text verwende ich ab hier durchgehend die weibliche Form, weil ich dieses „/innen“ fürchterlich finde. Gemeint sind trotzdem immer Männer und Frauen. Allerdings verwende ich nicht „frau“ für „man“, weil „man“ kein „Mann“ ist.

Der elastische Stoß (auf Golferianisch: der smash-factor)

Was wir beim Golfen machen, das deckt sich ganz gut mit dem, was im Physikunterricht der elastische Stoß genannt wird. Da lernt man unter anderem, dass, wenn man mit einem sehr schweren, sehr harten Gegenstand gegen einen sehr leichten, auch sehr harten Gegenstand schlägt, sich dieser mit (nahezu) der doppelten Geschwindigkeit des schweren Gegenstandes wegbewegt. Beweisen lässt sich das elegant über die schönen Erhaltungssätze für Energie und Impuls, aber das spare ich mir hier. Nun, ein Golfball ist nicht unendlich hart und verglichen mit dem Schlägerkopf zwar leichter, aber auch nicht sehr leicht. Deshalb kriegt man beim Golfen keinen Faktor zwei hin. Aus den Massenverhältnissen (Driverkopf ca. 200g, Golfball 45,9g) und den Formeln für den elastischen Stoß folgt ein Faktor von etwa 1,6. Gemessen werden beim Driver bis zu knapp 1,5, also ziemlich nahe an der Theorie mit den unendlich harten Stoßpartnern. Der Rest der Energie geht für Verformung, Verlust für die Richtungsänderung durch den Loft und den unten näher erläuterten Spin drauf. Bei den anderen Schlägern ist der Faktor geringer, weil bei den Eisen der Ball irgendwann eher hoch fliegt und nicht mehr in die Richtung des Schwunges. Der Faktor ist größer als eins, der Ball fliegt also schneller als sich der Schlägerkopf im Treffmoment bewegt. Dieses Verhältnis wird beim Golfen smash-factor genannt. Das Verhältnis wird schlechter, wenn der Treffer nicht mittig und nicht mit senkrechter Schlägerfläche erfolgt. Dann findet kein optimaler Energieübertrag statt, mit

entsprechenden Einbußen bei der Ballgeschwindigkeit. Merke: gut treffen ist wichtiger als unkontrolliert draufhämmern. Am Ende muss nicht der Schläger, sondern der Ball schnell sein, auch wenn da ein gewisser Zusammenhang besteht.

Übrigens schneller Ball: da oben im elastischen Stoß versteckte sich ein bisschen das „hart“. Physikalisch gesehen ist der Energieübertrag auf einen harten Ball besser als auf einen weichen. Soviel zur Werbung für „weichere“ Bälle. Das mag sich beim Schlag besser anfühlen oder auch besser steuerbar sein – aber am weitesten fliegt ein harter Ball.

Der Ballflug

Eiwei, das ist komplex, da spielen erstaunlich viele Effekte eine Rolle.

Anfangen tun wir mal mit dem schrägen Wurf, und dann kommen die Korrekturen dazu.

Wirft oder schlägt man einen Ball schräg nach oben, dann kann man die Flugbahn in zwei Komponenten aufteilen: Die Komponente parallel zur Erde und die senkrecht dazu. Parallel zur Erde ist das einfach eine konstante Geschwindigkeit. Senkrecht dazu wirkt aber die Erdbeschleunigung. Man kann das sehr schön mit sogenannten Vektoren darstellen und die Komponenten dann grafisch addieren. Die Bewegung senkrecht nach oben verlangsamt sich durch die Schwerebeschleunigung und kehrt sich dann Richtung Erde um. Das kann man ganz einfach berechnen. Mache ich hier nicht, aber das interessante Endergebnis möchte ich mitteilen: die Form der Flugkurve ist eine saubere Parabel, und am weitesten kommt man, wenn man bei gegebener Abschlaggeschwindigkeit genau einen Winkel von 45° wählt. Das funktioniert auch super, wenn man Golf auf dem Mond spielt – da gibt es nämlich keine Luft, die diese einfache und so schön symmetrische Lösung versaut.

Was macht die Luft jetzt aber?

Erst einmal bremst sie unseren Ball durch Reibung ab. Und zwar umso mehr, je schneller er sich bewegt. Wenn man diesen Luftwiderstand berücksichtigt, dann sieht die berechnete Kurve schon so ähnlich aus, wie wir das vom Golfen kennen: der Ball wird relativ flach (je nach Loft des Schlägers) in die Luft starten, aber deutlich steiler wieder auf die Erde zurückfallen. Aber wirklich gut passen Rechnung und Realität noch nicht zusammen. Denn es gibt den Magnus-Effekt, einen strömungsmechanischen Effekt mit deutlichem Einfluss.

Unser Ball bekommt beim Abschlag nämlich einen Spin. Und damit er den auch kräftig und gewollt bekommt, dafür sind die Rillen auf der Schlagfläche da. Da krallt der Ball sich fest und rutscht nicht durch. Bei den Eisen mit dem hohen Loft ist das unmittelbar einsichtig; wenn ich damit schlage, bringe ich den Ball in Rotation, und zwar rückwärts. Er dreht sich also unten nach vorne und oben nach hinten. Etwas weniger, aber im Grunde gleich, ist das auch beim Driver und anderen Schlägern mit weniger Loft. Die Spinraten sind bemerkenswert: knapp 50 Umdrehungen pro Sekunde macht der Ball beim Verlassen des Drivers, bei den Schlägern mit höherem Loft immer mehr bis hin zu 150 Umdrehungen pro Sekunde beim Pitching Wedge. Natürlich nur beim vollen Schlag. Der Ball fliegt nun durch die Luft und verdichtet unten die Luft vor sich, verdünnt sie aber oben durch die Drehung. Und damit erzielt er Auftrieb, und zwar nicht wenig. Das geht oftmals so weit, dass der Ball nach dem Abschlag sogar immer steiler steigt, ehe nachlassende Rotation und Geschwindigkeit den Effekt bedeutungsloser werden lassen. Unsere Kurve wird also nochmals anders, am Anfang leicht nach oben gekrümmt, dann wieder flacher und am Ende ziemlich steil nach unten. Das Bremsen durch die Luft und der Magnus-Effekt sind beim Driver am stärksten ausgeprägt und bei den Wedges am geringsten. Da ist die Flugkurve fast eine Parabel. Klar, denn da ist die Geschwindigkeit des Balles auch am geringsten.

Das Ganze führt nun dazu, dass unser schöner 45°-Winkel zum Erzielen der größten Schlagweite nicht mehr stimmt. Tatsächlich ist der optimale Winkel von der Ballgeschwindigkeit abhängig. Je schneller, desto flacher der optimale Winkel. Aha, deshalb hat der Driver einen geringen Loft, und deshalb sind die Eisen in der Länge nach unterschiedlichem Loft gestaffelt! Für das eigene Spiel gilt es wenigstens näherungsweise herauszufinden, mit welchem Loft man denn am weitesten kommt, zumindest bei den Schlägern mit geringem Loft. Je langsamer man schwingt, umso höher sollte der Loft des Drivers gewählt werden, um die maximale Weite zu erzielen.

Wo wir schon beim Magnus-Effekt sind: der Rückwärtsspin des Balles ist erwünscht, aber man kann ihn natürlich auch um die senkrechte Achse drehen lassen. Das ist dann meist unerwünscht, außer man kann es! Es führt einerseits zur gehassten Flugkurve nach rechts (golferianisch slice) mit einer Drehung von oben gesehen im Uhrzeigersinn, oder zur Flugkurve nach links, dem hook, mit der Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Linkshänderinnen vertauschen slice und hook bitte. Durch den Spin um die senkrechte Achse wird der Auftrieb nämlich zu einer seitlichen Kraft auf den Ball, die die Spielerin meistens zur Anwendung der 3-Minuten-Regel zwingt. Wer es aber kann, setzt das gezielt zum Umspielen von Hindernissen ein.

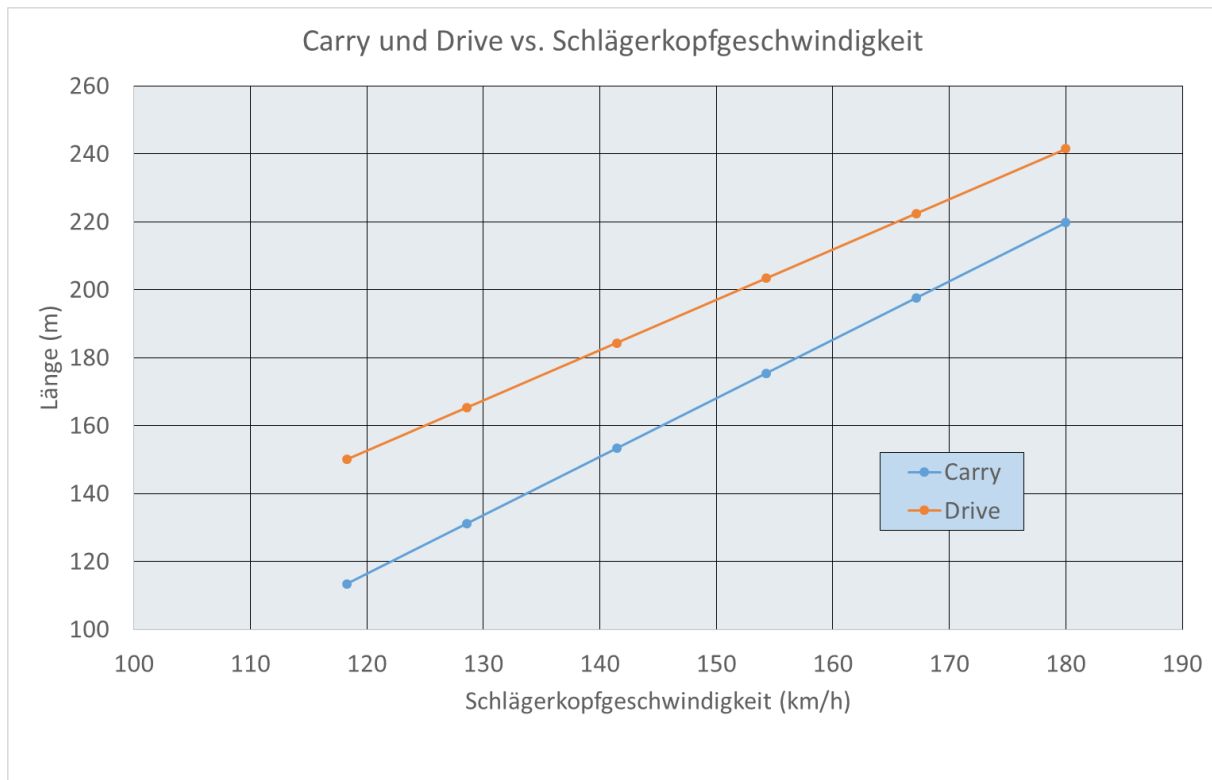
Böserweise kann man den Spin um die senkrechte Achse mindestens auf drei Arten hinbekommen: Schlagbahn von innen nach außen für hook, von außen nach innen für slice. Schlägerkopf nicht senkrecht zur Schwungrichtung: von oben gesehen nach links geneigt der hook, nach rechts geneigt der slice. Und letztlich, zumindest bei den Drivern und Hölzern wegen der gebogenen Form des Kopfes: zu weit außen getroffen: slice. Zu weit innen getroffen: hook. Ich schätze mal, das bringt Golflehrerinnen zur Verzweiflung, wenn da eine geradeaus schlägt, aber nur, weil sie den Schlägerkopf verkippt und damit das von außen nach innen schlagen irgendwie halbwegs kompensiert... Wenn man dagegen die Fehler alle auf der gleichen Seite macht, dann wird es für die Nebenfrau auf der Driving Range ungemütlich. Eigentlich war das jetzt schon ein Ausflug in die Schlagtechnik unten.

Nun noch ein bisschen was halbwegs Nützliches und Interessantes. Unten habe ich eine Grafik eingestellt, aus der man entnehmen kann, wie weit man mit unterschiedlichen Schlägerkopfgeschwindigkeiten bzw. unter Berücksichtigung des smash-factors mit unterschiedlichen Ballgeschwindigkeiten kommt. Sowohl carry als auch die Gesamtlänge inklusive roll sind angegeben. Man staune: eine höhere Schlägerkopfgeschwindigkeit wirkt sich überproportional aus, also erreiche ich deutlich mehr Länge mit nur moderater Erhöhung der Schlaggeschwindigkeit. Der roll wird dagegen kleiner, je weiter man schlägt – der Ball kommt steiler auf. Es scheint sich also zu lohnen, an seiner Schlägerkopfgeschwindigkeit zu arbeiten. Bitte aber nicht mit brachialer Gewalt, sondern unter Beibehaltung optimaler Treffer.

Die magischen Dimples auf dem Golfball dürfen natürlich in diesem physikalischen Exkurs auch nicht fehlen. Was hat es denn damit auf sich? Die zugrunde liegende Physik ist sehr komplex. Navier-Stokes-Gleichung ist ein Stichwort für die Beschreibung solcher Strömungsvorgänge, Differentialgleichungen sind zu lösen, Näherungen zu finden. Und am Ende kann bis heute niemand berechnen, wie diese Dimples im optimalen Fall aussehen sollten. Allerdings ist der grundsätzliche Effekt bekannt und hat eine enorme Auswirkung. Spin zusammen mit den Dimples hält eine Luftschicht praktisch am Ball „fest“, der Luftwiderstand wird gegenüber einer glatten Kugel erheblich herabgesetzt. Der Golfball flutscht also mittels Spin und Dimples nur so durch die Luft, er erzeugt nämlich durch diesen Übergangsbereich weit weniger Turbulenzen hinter sich, die eine Bremswirkung hätten. Ein glatter Ball käme nicht halb so weit, also ist das alles andere als eine eingebildete Marotte. Nur nach dem optimalen Optimum wird eben immer noch gesucht, so dass die Ballherstellerinnen nun mit dodekaedrisch geformten, lasergesteuert und nanometergenau

gezirkelten Dimples teure Bälle verkaufen, die womöglich (außer der Herstellerin weiß das keiner so genau) noch einen halben Meter weiter fliegen.

Noch eine vieldiskutierte Geschichte: Im Winter fliegen die Bälle nicht so weit wie im Sommer. Stimmt's? Ja, tut es. Die Dichte der Luft ist temperaturabhängig. Bei gleichem Luftdruck ist die Luft bei -5°C etwa 10% dichter als bei $+20^{\circ}\text{C}$. Das bremst den Ball dann natürlich aus, der Luftwiderstand steigt entsprechend. Der Zusammenhang ist zwar komplex, aber in erster Näherung kann man sicher gut von einem maximal linearen Zusammenhang ausgehen, der Ballflug wird in dem Fall also auch bis zu 10% verkürzt. Der Effekt ist beim Abschlag am größten, die langsameren Schläge beeinflusst das wegen des dort weniger bedeutenden Luftwiderstandes kaum.



Die Länge des Abschlags (mit Driver) in Abhängigkeit von der Schlägerkopfgeschwindigkeit kann im Bereich des Diagramms linear empirisch angenähert werden. Igitt, sagt die Physikerin, weil empirisch bedeutet, dass ich nicht verstanden habe, wie es funktioniert, sondern es nur beschreibe. Für das Verhältnis zur Golfballgeschwindigkeit wurde ein smash-Faktor von 1,5 zugrunde gelegt. Ich habe eine Formel von golfbaelle.de verwendet, es gibt aber verschiedene sehr ähnliche.

Und am Schluss noch ein Geheimitipp des Physikers (das bin ich, deshalb ist es keine Physikerin) zum Thema Wind: wenn der Wind von links kommt, übt das eine Kraft auf den Ball aus, die ihn nach rechts treibt. Wenn der Wind von hinten kommt, fliegt der Ball weiter. Das sollte man beim Angriff auf die Fahne berücksichtigen. Was passiert, wenn der Wind von rechts kommt oder von vorne, verrate ich aber nicht. Ich will ja nicht alle meine Vorteile als Physiker aus der Hand geben.

Schlagtechnik

Wir wissen es natürlich alle: je höher die Schlägerkopfgeschwindigkeit im Treffmoment, desto mehr Energie wird auf den Ball übertragen, desto schneller und weiter fliegt er auch. Aber wie bekomme ich den Schlägerkopf möglichst schnell?

Im Prinzip haben wir ein Doppelpendel: die Drehung des Oberkörpers (Wirbelsäule) und die Entwinkelung der Handgelenke als Drehachsen, Arme und Schläger als Pendel. Beide Bewegungen

müssen bei einem vollen Schlag so koordiniert werden, dass exakt im Treffmoment die größte Geschwindigkeit des Schlägerkopfes erreicht wird. Außerdem muss die Bewegung idealerweise exakt in einer Ebene erfolgen, deren Neigung gegenüber dem Boden dem Lie-Winkel, also dem Winkel zwischen der Sohle des Schlägers und des Schaftes, entspricht. Jedenfalls, wenn das statische fitting stimmt, ich also die für mich richtige Schlägerlänge ermittelt habe. Das heißt, mit dem Driver hole ich relativ flach aus, mit dem Wedge sehr steil. Und, nebenbei, der Ball muss 90° zur Schlägerfläche geneigt mit dem Sweet Spot des Schlägers getroffen werden, also mittig und rechtwinkelig. Abweichungen von dieser physikalischen Ideallvorstellung, und das können sein:

- Zu wenig Aufdrehen des Oberkörpers
- Zu frühes Entwickeln der Handgelenke (zu spät gibt es kaum)
- Abweichungen von oder Korrekturen der Schlagebene während des Schlages
- Außermittige Treffer (links oder rechts, aber auch bis hin zu toppen oder fetten Schlägen)
- Schiefe Lage des Schlägerblattes im Treffmoment
- uvm.,

führen zu Geschwindigkeitsverlust und Richtungsstreuung inklusive der oben angesprochenen hooks und slices. Ganz einfache Physik, ganz schwierige Umsetzung. Deshalb haben Golflehrerinnen so viel zu tun. Physikerinnen neigen Gerüchten zufolge allerdings zum Autodidaktentum, weil sie ja wissen, wie es eigentlich gehen muss, und sich äußerst ungern da reinreden lassen. Ich gebe zu, dieses Gerücht setze ich rein basierend auf eigener Erfahrung hier und jetzt in die Welt.

Die oben genannten Randbedingungen für einen guten Schlag sind allgemeingültig. Trotzdem schlägt man mit einem Driver anders als mit einem Holz oder Hybrid vom Fairway oder mit den Eisen. Das hat aber mehr mit der Form und den Eigenschaften des Schlägerkopfes zu tun. Mit den Eisen schlage ich etwas von oben kommend, nach dem Ballkontakt ist erst der tiefste Punkt erreicht und schlägt ein Divot heraus. Das möchte ich mit einem Holz oder Hybrid nicht machen, da gleitet der Kopf über den Rasen. Und beim aufgeteeten Abschlag treffe ich mit dem Driver schon in der Aufwärtsbewegung, deshalb liegt der Ball weiter links. Physikalisch führen mir diese Feinheiten hier aber zu weit. Hier reiche ich für weitere Informationen gerne an die Golflehrerin ihres Vertrauens weiter.

Zum Putten dagegen gibt es auch noch etwas Physik. Anders als beim Ballflug mit der komplexen strömungsmechanischen Behandlung ist das putten physikalisch gut berechenbar. Die wesentlichen Faktoren sind Gleitreibung und Geländeneigung. Die Gleitreibung mit Luft und Untergrund führt dazu, dass der Ball über die Zeit langsamer wird. Durch die Geländeneigung ergibt sich, dass ein kleiner Anteil der Schwerkraft eine Kraft entlang des Pfades der stärksten Geländeneigung nach unten auf den Ball ausübt. Auf Physikerianisch: man zerlegt den Kraftvektor zum Erdmittelpunkt in die senkrecht und horizontal zum Gelände verlaufenden Komponenten. Die horizontale Komponente bewirkt die Beschleunigung (unter Physikerinnen zählt Bremsen auch als Beschleunigung!) auf dem Grün, die senkrechte sorgt dafür, dass der Ball nicht davonschwebt. Die sich hieraus ergebenden Bewegungsgleichungen sind einfach erfassbar. Wesentliches Resultat: Je langsamer der Ball rollt, desto stärker weicht die Bahn von einer geraden Linie ab, sofern es ein Gefälle nach links oder rechts gibt. Golferinnen kennen das, der Ball „bricht“ irgendwann und entfernt sich erst deutlich von der Richtung, in der er geschlagen wurde, wenn er langsam wird. Das sollte man bedenken, wenn man das Grün „liest“. Da man die Bewegungsgleichung nicht im Kopf lösen kann, ist Erfahrung gefragt. Dennoch liegt es im Bereich des technisch Machbaren, einen lasergestützten Geländescanner mit einem Feuchtesensor und Grashalmlängenermittlung zu entwickeln, der aus den Daten die für dieses Grün zu erwartende Gleitreibung und die Beschleunigungen durch die Geländeneigung bestimmt und dann die Bewegungsgleichung löst. Ausgabe wäre der Schlagwinkel und die notwendige Schlag- bzw. Ballgeschwindigkeit am Anfangspunkt. Warum gibt es das bloß noch nicht? Putts aus 15m wären kein

Problem mehr, sofern man nur Winkel und Geschwindigkeit richtig an den Ball bringt. Wem das noch zu schwierig erscheint, der könnte seinen Schläger auch in ein leicht zu entwickelndes Maschinchen spannen, das genau diese Aufgabe sorgfältig erfüllt. Da fühlt sich die Physikerin sicher, im Gegensatz zu den Turbulenzen bei den Golfball-Dimpeln.

Schlägertechnik

Warum ist ein Driver so lang, ein Wedge dagegen kurz?

Je länger ein Schläger ist, desto schneller bewegt sich der Schlägerkopf bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit des Körpers bzw. Drehgeschwindigkeit der Handgelenke. Mit dem Driver will ich weit schlagen, also muss er lang sein. Je länger so ein Schläger ist, umso schwieriger wird es aber auch, den Ball im Sweet Spot und kontrolliert zu treffen. Die meisten werden den Golferinnenwitz kennen: Warum soll man bei einem Gewitter ein Eisen 1 in die Luft halten? Weil nicht mal die Liebe Göttin ein Eisen 1 trifft! Je näher ich zum Loch komme, umso mehr kommt es auf Zielgenauigkeit an. Und die verbessert sich, je kürzer der Schläger ist. Voilá. Soweit ganz allgemein.

Jetzt will ich mal zwei spezielle Themen herausgreifen.

1. Eisen – Cavity Back und Muscle Back

Grundsätzlich sind ja jedes Jahr die neuen Schläger wieder noch fehlerverzeihender, noch treffsicherer und erzielen noch mehr Weite. Irgendwie erinnert mich das an die Waschmittelwerbung in den Siebzigern: da wurde die Wäsche auch ständig noch weißer. Aber einen nachvollziehbaren Unterschied gibt es: den Unterschied zwischen Cavity Back und Muscle Back bei den Eisen. Spielerinnen mit mittlerem und höherem Handicap treffen den Sweet Spot nicht regelmäßig. Die Streuung ist einfach zu groß. Sie brauchen möglichst Schläger, die darauf nicht empfindlich reagieren. Das erreicht man, indem man dem Schlägerkopf ein möglichst hohes Trägheitsmoment vor allem um die senkrecht zum Boden stehende Achse gibt – man packt Gewicht nach außen. Nun brauche ich mehr Kraft, um den Schlägerkopf zu verdrehen, er bleibt länger richtungsstabil, auch wenn ich rechts oder links von der Mitte treffe. Auf Physikerianisch: das durch den außermittigen Treffer aufgebrachte Drehmoment führt zu einer geringeren Winkelbeschleunigung, je höher das Trägheitsmoment um die dazu senkrechte Achse ist. Gewicht nach außen bekomme ich aber, indem ich den Schläger hinten aushöhle: Cavity Back, das ausgehöhlte Hinterteil. Richtig gute Spielerinnen brauchen das nicht. Die wollen möglichst viel Gewicht unten, damit sie mehr Energie auf den Ball übertragen können: Muscle Back. Wie viel das ausmacht? Keine Ahnung. Aber zumindest das Prinzip ist einleuchtend und sollte Anfängerinnen mit zu viel Geld davon abhalten, sich einen Tourensatz Eisen mit Muscle Back zu kaufen, weil es ja das Teuerste und Beste sei. Damit spielen sie schlechter als sie müssten.

2. Graphit oder Stahl als Schaft?

Auch hier gibt es nicht „das Bessere“. Auch hier hängt es von der Spielstärke ab. Das Prinzip ist folgendes: ein Graphitschaft liegt hinsichtlich seiner Steifigkeit deutlich niedriger als ein Stahlschaft. Beim Beschleunigen verbiegt er sich damit mehr, der Schlägerkopf hinkt sozusagen der Bewegung vorne am Griff hinterher. Idealerweise entspannt er sich gerade im Treffmoment am stärksten, so dass wir im unteren Teil unseres Doppelpendels nun einen weiteren Geschwindigkeitsbeitrag bekommen: der Schaft trägt durch eine zusätzliche Beschleunigung des Schlägerkopfes ebenfalls bei. Oh Wunder, der Ball fliegt weiter als mit Stahlschaft – jedenfalls theoretisch und ein bisschen. Und warum gibt es dann nicht nur noch Graphitschäfte? Weil es auch einen Nachteil gibt: der weichere Graphitschaft verursacht nicht nur diesen Peitscheneffekt, sondern hält den Schlägerkopf nicht mehr wirklich richtungsstabil. Wenn er sich biegt, dann kann er sich auch verdrehen. Für sehr gute

Spielerinnen ist letzteres aber ein zu großer Nachteil. Die Länge haben sie, aber sie brauchen auch die Treffsicherheit. Deshalb spielen Profis fast nur Stahlschäfte bei den Eisen. Bei den Hölzern und Drivern überwiegen dagegen die Vorteile des Graphits, beim kurzen Spiel mit den Wedges schon allgemein der Stahl. Da kommt es auf die Länge halt nicht mehr an.

Und nun aber weg von der Theorie und ran an den Ball! Ein schönes Spiel!