



PFEILPHYSIK · AERODYNAMIK · BALLISTIK

Die Bahn des *Pfeils*.

Was einen Pfeil stabil hält, warum Seitenwind nicht schiebt
sondern bremst, und weshalb beim Auftreff Masse mehr zählt als
Geschwindigkeit.

Ein Pfeil, drei Phasen.

Wer einen Pfeil abschießt, löst drei aufeinanderfolgende Vorgänge aus, die nach völlig verschiedenen Gesetzen ablaufen. Während des Abschusses bricht der Schaft aus seiner Achse aus und schwingt sich in einer Wellenbewegung am Bogen vorbei — das ist innere Ballistik, das Zusammenspiel von Sehne, Schaft und Bogen in weniger als 15 Millisekunden. Danach bestimmen Schwerkraft und Aerodynamik den Weg zur Scheibe — äußere Ballistik, wo die Spitzenform, der Schaftdurchmesser und die Befiederung entscheiden, wie stabil und wie windbeständig der Flug ist. Und schließlich, beim Auftreff, regiert eine dritte Physik: terminale Ballistik, wo es auf die Frage ankommt, wie tief und wie zuverlässig ein Pfeil eindringt.

Dieser Leitfaden folgt dem Pfeil durch alle drei Phasen. Er erklärt, warum ein zu steifer oder zu weicher Schaft streut — und wie man das hört. Er zeigt, warum Seitenwind einen Pfeil nicht seitlich wegdrückt, sondern ihn abbremst. Und er legt dar, warum ein schwerer, langsamer Pfeil in festen Materialien tiefer eindringt als ein leichter, schneller. Das Archer's Paradox und der Begriff Spine sind in *Die Feder im Fenster* und *Die Kunst des Freigangs* ausführlich behandelt — hier geht es um die Physik dahinter, die beim Tuning und beim Scheibenstehen wirksam wird.

~15 ms

Kontaktzeit zwischen Sehne und Pfeil beim Recurve — in dieser Zeitspanne werden alle Abschussfehler übertragen.

>4 Ringe

Seitliche Windabdrift eines gut abgestimmten Recurvepfeils bei 3 m/s Seitenwind auf 70 m (Dr. J. Park, 2020).

30 %

Penetrationsverlust, wenn der Schaftdurchmesser größer als die Ferrule der Pfeilspitze ist (Ashby, 2019).

© SO LIEST DU DIESEN LEITFADEN

Teil I behandelt die Abschussphase: Spine, Schwingungsmoden und was falsche Steifigkeit im Trefferbild anrichtet. Teil II erklärt Aerodynamik und Stabilität im Freiflug — Windabdrift, FOC, Befiederung. Teil III widmet sich der Auftreffphysik: Impuls vs. kinetische Energie, Spitzengeometrie und Reibung im Wundkanal. Jeder Abschnitt schließt mit einer Box „An der Schießlinie“.

INHALT

TEIL I · ABSCHUSS

01 Statischer und dynamischer Spine

02 Schwingungsmoden und Knotenpunkte

TEIL II · FREIFLUG

03 Aerodynamik und Grenzschicht

04 Stabilität, FOC und Windabdrift

TEIL III · AUFTREFF

05 Kinetische Energie oder Impuls?

06 Spitzengeometrie und Eindringtiefe

I

Fünfzehn Millisekunden die *alles bestimmen.*

Bevor der Pfeil in freier Luft ist, hat er bereits sein Schicksal erhalten. Spine und Schwingungsmoden entscheiden, ob der vordere Knotenpunkt auf der Ziellinie bleibt — oder nicht.

01 Statischer und dynamischer Spine

02 Schwingungsmoden und Knotenpunkte

Zwei Steifigkeiten, eine Wahrheit.

Spine ist das Wort, mit dem der Bogensport die Biegesteifigkeit eines Pfeilschafts bezeichnet — und es verbirgt dahinter eine wichtige Unterscheidung: Es gibt zwei verschiedene Spine-Werte, die sich nach verschiedenen Gesetzen verhalten und für das Tuning unterschiedlich relevant sind.

Der **statische Spine** ist ein reiner Materialwert. Man legt den Schaft auf zwei Stützpunkte im Abstand von 26 Zoll (etwa 66 cm), hängt in der Mitte ein Gewicht von zwei Pfund an und misst die Durchbiegung in Tausendstel Zoll. Diese Zahl — beispielsweise 340 oder 500 — beschreibt ausschließlich die Steifigkeit des Schaftmaterials, unabhängig von allem anderen. Schwere Spitze, leichte Nocke, langer oder kurzer Schnitt: all das geht in den statischen Spine nicht ein.

Was beim Abschuss tatsächlich passiert, beschreibt der **dynamische Spine**. Er bezeichnet das reale Biegeverhalten unter den extremen axialen und seitlichen Kräften der Beschleunigung. Eine schwerere Pfeilspitze erhöht die träge Masse vorn: Der Schaft wird stärker gestaucht, bevor die Spitze mitkommt — der Pfeil verhält sich dynamisch weicher, obwohl der statische Spine unverändert bleibt. Eine schwerere Nocke oder stärkere Befiederung am Schaft-Ende erhöht dagegen die Rückträchtigkeit: Der Pfeil reagiert dynamisch steifer. Pfeillänge, Zuggewicht und Bogensystem spielen ebenfalls hinein.

TAB. 1 · EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN DYNAMISCHEN SPINE

FAKTOR	RICHTUNG DER ÄNDERUNG	DYNAMISCHER EFFEKT
Schwerere Spitze	erhöht Frontmasse	Pfeil reagiert weicher
Schwerere Nocke / Federn	erhöht Heckmasse	Pfeil reagiert steifer
Längerer Schaft	verlängert den Hebelarm	Pfeil reagiert weicher
Höheres Zuggewicht	erhöht axiale Druckkraft	Pfeil reagiert weicher

© AN DER SCHIESSLINIE

Wer den Schaft wechselt, aber die Spitze beibehält, hat den statischen Spine verändert, nicht aber zwingend das Tuningproblem gelöst. **Tuning ist immer Systemtuning:** Schaft, Spitze, Nocke und Zuggewicht zusammen ergeben das dynamische Verhalten. Ein unverändert schlechtes Trefferbild nach einem Schaftwechsel ist oft ein Hinweis, dass die Spitzenmasse angepasst werden muss.

Wo der Pfeil ruht im Schwingen.

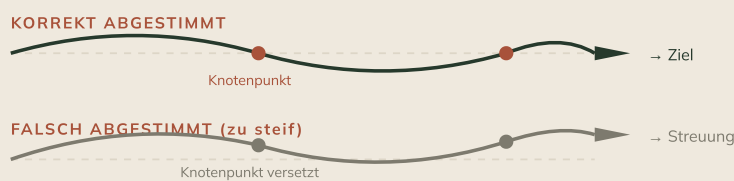
Sobald der Pfeil den Bogen verlassen hat, schwingt er weiter — das ist keine Störung, sondern physikalische Notwendigkeit. Der Schaft wurde während des Abschusses elastisch verformt und federt nun zurück. Die Frage ist nicht, ob er schwingt, sondern wie: Bleibt der vordere Ruhepunkt — der vordere Knotenpunkt — auf der Ziellinie, fliegt der Pfeil dorthin. Wandert er heraus, geht Energie verloren und die Streuung wächst.

Ein schwingender Schaft hat entlang seiner Längsachse bestimmte **Knotenpunkte** — Orte, die in Bezug auf die transversale Schwingungsebene relativ ruhig bleiben. Der erste Biegemodus, der für die Flugstabilität entscheidend ist, besitzt genau einen vorderen und einen hinteren Knotenpunkt. Forschungsarbeiten an Verbundpfeilen mit dreidimensionaler Scanning-Laser-Doppler-Vibrometrie (SLDV) haben gezeigt, dass sich das Schwingungsverhalten solcher Schäfte analytisch exakt mit der klassischen Euler-Bernoulli-Balkentheorie beschreiben lässt. Die natürliche Eigenfrequenz dieses Systems hängt von Schaftsteifigkeit, Masse und Massenverteilung ab.

Für das Tuning bedeutet das: Ein Pfeilset ist dann korrekt abgestimmt, wenn der vordere Knotenpunkt beim Verlassen des Bogens auf der geometrischen Linie in Richtung des Zielzentrums liegt. Das archaische Bare-Shaft-Tuning — Schießen ohne Federn — prüft genau das. Ein Bare Shaft, der hoch oder tief im Ziel ankommt, zeigt eine vertikale Knotenverschiebung an; ein Schaft, der links oder rechts steht, eine horizontale. Der korrekte dynamische Spine bringt den Knotenpunkt zurück in die Achse.

DER VORDERE KNOTENPUNKT

SCHWINGUNGSACHSE UND ZIELLINIE



Knotenpunkte und Ziellinie. Nur wenn der vordere Knotenpunkt auf der Ziellinie verbleibt, fliegt der Pfeil dahin, wohin er zeigt. Ein falscher Spine — zu steif oder zu weich — verschiebt diesen Punkt aus der Achse und erzeugt systematische Streuung.

© AN DER SCHIESSLINIE

Bare-Shaft-Tuning ist kein Ritual, sondern eine direkte Messung des Knotenpunkts. **Wenn ein Bare Shaft systematisch tiefer trifft als ein befiederter Pfeil**, ist der Spine zu weich — der Schaft kommt in einer ungünstigen Schwingungsphase am Ziel an. Zu steifer Spine zeigt sich umgekehrt. Ziel ist Deckungsgleichheit.

III

Luft, Widerstand und *Stabilität*.

Im Freiflug regieren Schwerkraft und Aerodynamik. Laminarströmung oder turbulent, vorwärts schwerpunktiert oder nicht — die Physik des Pfeilflugs widerspricht an entscheidenden Stellen dem Augenschein.

03 Aerodynamik und Grenzschicht

04 Stabilität, FOC und Windabdrift

Was die Luft mit dem Pfeil macht.

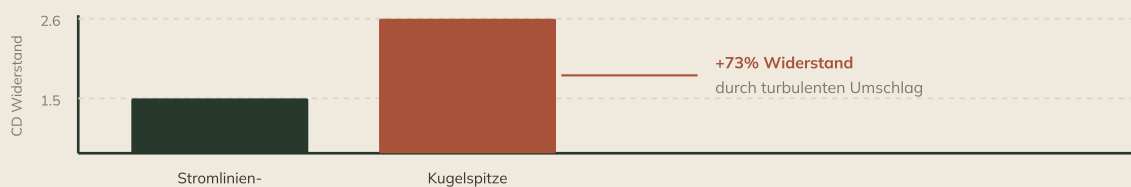
Ein Bogensportpfeil fliegt mit etwa 60 bis 100 Metern pro Sekunde — in einem strömungsphysikalischen Bereich, in dem Viskositätseffekte und die Beschaffenheit der Luftschicht unmittelbar an der Schaftoberfläche die entscheidende Rolle spielen. Diese Grenzschicht kann laminar verlaufen — geordnet, mit geringem Widerstand — oder turbulent werden, was den Luftwiderstand abrupt erhöht.

Messungen in reflexionsfreien Windkanälen, darunter Experimente mit dem Magnetschwebsystem des japanischen Luft- und Raumfahrtforschungszentrums JAXA (60-cm-MSBS), in dem Pfeile ohne physische Stützvorrichtung in der Strömung gehalten werden, zeigen: Bei einem Standard-Recurvepfeil mit schlanker Spitze bleibt die Grenzschicht im typischen Betriebsbereich (Reynolds-Zahl 4.000 bis 15.000) laminar. Der Widerstandskoeffizient liegt dann bei günstig niedrigen 1,5. Sobald die Strömung umschlägt — durch eine ungünstige Spitzengeometrie ausgelöst — steigt dieser Wert auf etwa 2,6. Das entspricht annähernd einer Verdopplung des Widerstands bei gleicher Geschwindigkeit.

Die **Nasenform** ist dabei der entscheidende Auslöser. Untersuchungen mit verschiedenen Spizentypen (stromlinienförmig, kugelförmig, stumpf) zeigen, dass stromlinienförmige Spitzen den Grenzschichtumschlag deutlich verzögern. Kugelförmige Spitzen hingegen lösen den turbulenten Umschlag früher aus — mit merklichen Konsequenzen für Flugbahn und Windabdrift.

LAMINAR GEGEN TURBULENT

WIDERSTANDSKOEFFIZIENT NACH GRENZSCHICHTZUSTAND



Grenzschicht entscheidet. Laminar bleibende Strömung (Stromlinienspitze) hält den Widerstandskoeffizienten auf etwa 1,5. Turbulenter Umschlag durch ungünstige Spitzengeometrie lässt ihn auf etwa 2,6 steigen — das bedeutet deutlich mehr Verzögerung und größere Windanfälligkeit auf der gesamten Flugbahn.

🎯 AN DER SCHIESSLINIE

Für Outdoor-Wettkämpfe auf 70 m — besonders bei wechselndem Wind — lohnt es, Spizentypen bewusst zu wählen. **Stromlinienförmige Spitzen** halten die Grenzschicht länger laminar und verringern damit Abdrift und Geschwindigkeitsverlust. Das gilt nicht nur für den Wettkampf: Jeder Meter, den ein Pfeil weniger abbremst, bedeutet flachere Bahn und weniger Entfernungsschätzfehler.

Warum Wind bremst, nicht schiebt.

Das vielleicht kontraintuitivste Ergebnis der Pfeilphysik betrifft die Windabdrift. Der naheliegende Gedanke ist: Wind von rechts drückt den Pfeil nach links. Das stimmt — aber es ist nicht der Hauptmechanismus. Die primäre Ursache der seitlichen Abdrift ist der Luftwiderstand selbst. Das hat der Ingenieur Dr. James Park in mehreren publizierten Studien experimentell und rechnerisch nachgewiesen.

Der Grund liegt im sogenannten **Weathercocking-Effekt**: Der Pfeil richtet sich durch die Befiederung automatisch in den Ergebniswind aus — also in den resultierenden Vektor aus seiner eigenen Geschwindigkeit und dem Seitenwind. Bei Wind von rechts dreht das Pfeilheck leicht nach rechts, die Spitze leicht nach links. Der Widerstand wirkt immer entlang der Längsachse des Pfeils — und diese Achse steht nun schräg zur Ziellinie. Damit hat der Widerstandsvektor eine seitliche Komponente: Diese seitliche Bremskraft ist es, die den Pfeil abträgt.

Die Konsequenz ist eindeutig: **Windabdrift minimiert man durch minimalen Luftwiderstand**, nicht durch mehr Befiederung. Dünne, dichte Schäfte leisten das am besten. Übergroße Federn erzeugen zwar mehr Stabilität, aber auch mehr Drag — und damit mehr Abdrift. Für 3 m/s Seitenwind hat Park errechnet, dass selbst gut abgestimmte Recurvepfeile auf 70 m über vier Ringbreiten abtreiben — Compound-Schützen auf 50 m etwa zwei Ringe.

*Wer Windabdrift minimieren will, muss den **Widerstand** minimieren — nicht die Stabilität maximieren.*

DR. JAMES PARK · MINIMIZING WIND DRIFT OF AN ARROW, 2012

FOC — Front of Center — beschreibt, wie weit der Massenschwerpunkt vor der geometrischen Mitte des Pfeils liegt, gemessen in Prozent der Gesamtlänge. Typische Wettkampfpfeile liegen bei 7 bis 15 % FOC. Der Schwerpunkt muss stets vor dem aerodynamischen Druckzentrum liegen, das durch die Befiederung weit nach hinten verschoben wird. Liegt er dahinter, überschlägt sich der Pfeil im Flug. FOC beeinflusst die dynamische Stabilität und die Energieerhaltung auf Distanz deutlich — auf die Anfangsgeschwindigkeit hat es keinen direkten Einfluss, diese wird allein durch die Gesamtmasse des Pfeils bestimmt.

© AN DER SCHIESSLINIE

Wer bei Outdoor-Wettkämpfen systematisch im Seitenwind streut, prüft zuerst den Schaftdurchmesser und die Federgröße. **Kleinerer Schaft, kleinere Federn** — solange die Stabilität gewährleistet ist — bringen mehr als jede Windkorrektur. Der richtige Blickwinkel: Nicht „wie korrigiere ich den Wind?“, sondern „wie verkleinere ich, was der Wind angreifen kann?“

III

Wenn der Pfeil *ankommt.*

Beim Auftreff gilt eine dritte Physik. Nicht Geschwindigkeit, sondern Masse entscheidet über Eindringtiefe. Nicht Kinetische Energie, sondern Impuls. Und die Geometrie der Spitze bestimmt, wie viel davon am Ziel ankommt.

05 Kinetische Energie oder Impuls?

06 Spitzengeometrie und Eindringtiefe

Masse schlägt Geschwindigkeit.

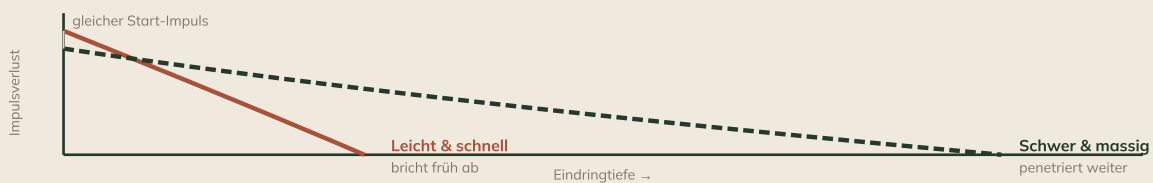
Die am längsten geführte Debatte in der angewandten Pfeilphysik dreht sich um eine scheinbar einfache Frage: Was bestimmt die Eindringtiefe in feste Materialien — kinetische Energie oder Impuls? Die Antwort fällt eindeutig aus, sobald man sich die Physik der Verzögerung anschaut.

Kinetische Energie ($\frac{1}{2} \times m \times v^2$) skaliert quadratisch mit der Geschwindigkeit. Ein leichter, schneller Pfeil erzeugt rechnerisch große Energiewerte — und die Industrie nutzt das gerne. Für die Berechnung, wie effizient ein Bogen Energie auf den Pfeil überträgt, ist die kinetische Energie das richtige Maß. Als Vorhersage für Eindringtiefe in festem Material versagt sie aber: Ein schnelles, leichtes Projektil gibt seine Energie beim ersten Kontakt mit hartem Widerstand (Knochen, hartes Holz) in Wärme und Verformung ab — die Penetration bricht ab.

Der **Impuls** ($p = m \times v$) beschreibt die Trägheit in Bewegung — den Widerstand eines Körpers gegen Verzögerung. Er skaliert linear mit der Masse. Ein massereicherer Pfeil, der langsamer fliegt, hat bei gleichem Bogensystem oft höheren Impuls. Und dieser Impuls drückt die Klingen kontinuierlich durch das Material, weil die Verzögerungskurve flacher verläuft. Feldstudien des Bogenjagdforschers Dr. Ed Ashby über drei Jahrzehnte hinweg belegen dies: Bei identischem Bogensystem penetriert der schwerere Pfeil tiefer — trotz geringerer Geschwindigkeit und geringerer kinetischer Energie.

VERZÖGERUNGSKURVEN IM VERGLEICH

LEICHTER VS. SCHWERER PFEIL IM AUFTREFF



Flache Verzögerungskurve gewinnt. Der schwere Pfeil (gestrichelt) verliert seinen Impuls langsamer und dringt tiefer ein — obwohl beide mit ähnlichem Impuls beginnen. Der leichte, schnelle Pfeil gibt seinen Impuls kompakt ab und stoppt früh.

🎯 AN DER SCHIESSLINIE

Für die Scheibenpfeil-Wahl beim Training und Wettkampf auf kurze Distanz spielt dieser Unterschied kaum eine Rolle — der Pfeil trifft auf nachgiebiges Material. **Sobald es um Penetration in hartes Material geht** — Holzziele, 3D-Scheiben mit hartem Kern, Bogenjagd — verschiebt sich die Entscheidung hin zur Masse. Kinetische Energie ist dann das falsche Auswahlkriterium.

Die Geometrie des Eindringens.

W

enn Impuls die Triebkraft der Penetration ist, entscheidet die Geometrie der Spitze darüber, wie viel davon als Eindringtiefe ankommt. Jede Jagdspitze ist in der Sprache der Mechanik ein System schiefer Ebenen — eine einfache Maschine, deren Effizienz sich mit dem mechanischen Vorteil (MA) beschreiben lässt.

Der mechanische Vorteil beschreibt das Verhältnis von Schneidklingenlänge zu der Fläche, die tatsächlich Widerstand erzeugt. Eine schmale, lange Spitze mit einem einzigen Schneidklingenpaar hat einen MA von etwa 3 — das heißt, eine vorwärts gerichtete Kraft von einem Pfund überwindet drei Pfund Gewebewiderstand. Fügt man eine zweite Klinge im 90-Grad-Winkel hinzu — vier Schneidflächen statt zwei — halbiert sich der mechanische Vorteil auf 1,5. Mehr Schnittfläche bedeutet breiteren Wundkanal, aber geringere Penetrationskraft in hartem Material.

Mindestens ebenso relevant ist das Verhältnis von **Schaftdurchmesser zu Ferrule** (der Basis der Spitze). Ist der Schaft mindestens 5 % dünner als die Ferrule, kann das Gewebe vom nachfolgenden Schaft wegbleiben — Eindringtiefe steigt um etwa 10 %. Ist der Schaft dicker als die Ferrule, klemmt verdrängtes Gewebe den Schaft ein: Penetrationsverlust bis zu 30 %. Ashbys 30 Jahre Feldforschung belegen diesen Befund zuverlässig.

TAB. 2 · EINFLUSS AUF PENETRATIONSTIEFE

FAKTOR	BEDINGUNG	WIRKUNG AUF EINDRINGTIEFE
Schaft vs. Ferrule	Schaft 5 % kleiner als Ferrule	+10 %
Schaft vs. Ferrule	Schaft größer als Ferrule	-30 %
Spitzenintegrität	auch minimales Verbiegen der Spitze	-14 % (im Mittel)
Schaftprofil	konisch verjüngend (tapered)	+8 % vs. parallel; +15 % vs. barrel
Strukturelles Versagen	jede Verformung beim Auftreff	Penetration bricht ab

Strukturelle Integrität rangiert bei Ashby auf Platz 1 seiner 12 Penetrationsfaktoren — noch vor FOC und mechanischem Vorteil. Ein Pfeil, dessen Spitze oder Schaft beim ersten Kontakt nachgibt, leitet Energie als Vibrationsenergie ab, anstatt das Material zu schneiden. Das gilt für Bogenjagd ebenso wie für 3D-Ziele mit hartem Kunststoffkern.

© AN DER SCHIESSLINIE

Wer 3D-Scheiben schießt und Pfeilspitzen häufig wechseln muss, weil sie sich verbiegen: **Das Verbiegen ist nicht nur teuer, es kostet systematisch Penetration** — und bei starker Verbiegung reicht der Pfeil nicht ans Ziel zurück. Spitzen, die ihre Form halten, sind kein Luxus, sondern Physik. Und der Schaft sollte stets schmaler als die Spitzenbasis sein.

Vier Einsichten

*Der Pfeil gehorcht der Physik — wer sie kennt,
stört sie nicht.*

FACHBEREICH BOGENSPORT · ASC GÖTTINGEN

01

Tuning ist Systemdenken. Statischer Spine beschreibt das Material. Dynamischer Spine beschreibt das Verhalten im Abschuss. Beide sind unterschiedlich — und nur der dynamische entscheidet darüber, ob der vordere Knotenpunkt auf der Ziellinie bleibt. Spitze, Nocke und Zuggewicht gehören immer mit in die Rechnung.

02

Laminare Strömung ist ein Wettbewerbsvorteil. Die Spitzenform entscheidet, ob die Luftschicht am Schaft geordnet oder turbulent bleibt. Turbulenter Umschlag erhöht den Luftwiderstand um bis zu 70 % — und damit die Windanfälligkeit. Schlanke Spitzen, dünne Schäfte und minimale Befiederungsfläche schützen vor Abdrift.

03

Wind bremst, er schiebt nicht. Seitliche Abdrift entsteht nicht durch direkten Winddruck auf den Schaft, sondern durch die seitliche Komponente des Luftwiderstands, wenn der Pfeil sich — durch Weathercocking — schräg in den Ergebniswind dreht. Weniger Drag bedeutet weniger Abdrift, nicht mehr Federn.

04

Beim Auftreff regiert der Impuls. Kinetische Energie ist das richtige Maß für Bogeneffizienz, nicht für Penetration. Massereiche Pfeile mit kontinuierlicher Verzögerungskurve, korrekt proportionierter Spitze und struktureller Integrität dringen tiefer ein als leichte, schnelle — unabhängig vom Energiewert.



Die Bahn *des Pfeils.*

Ein Leitfaden zur Physik des Pfeilflugs — von Spine und Schwingungsmode über Aerodynamik und Windabdrift bis zur Penetrationsphysik beim Auftreff. Für Schützinnen und Schützen, die verstehen wollen, was hinter den Tuningentscheidungen steckt.

Herausgegeben vom Fachbereich Bogensport im ASC Göttingen von 1846 e.V. Text und Konzept: Hartmut Stöpler. Der Autor schreibt unabhängig. Bogenschießen im ASC Göttingen: Anfängerkurse, Training, Bogenplatz in Grone und Bogenevents — olympisch, Feldbogen, 3D und Halle.

www.bogenschiessen-goettingen.de