Experimentelle Untersuchungen zur Biegung der Fliegenrute

verfasst & aufgestellt von Bauassessor Tobias Hinzmann

Inhaltsverzeichnis:

A) GRUNDLAGEN 2

B) GEOMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN 3

B1) FLEXIBLE FLIEGENRUTE 3
B1.1) Biegeverhalten der flexiblen Fliegenrute 4
B2) ABSOLUT STEIFE FLIEGENRUTE 6
B3) WEGE DER RUTENSPITZEN 6
B4) WIRKUNGSRICHTUNGEN 8
B4.1) Richtung der Geschwindigkeit 8
B4.2) Vektorielle Darstellung der Wirkungsrichtungen 8
B4.3) Hebelarm 10

C) DYNAMISCHE UNTERSUCHUNGEN 10

C1) BEGINN DES STOPPS BZW. DER RÜCKSTELLUNG / ENTLADUNG 11
C2) WEG-ZEIT -BEZIEHUNGEN AUS DER BILDABFOLGE DER WURFSEQUENZ 13
C3) ERMITTLUNG DER GESCHWINDIGKEITEN AUS DER BILDABFOLGE 15
C3.1) Geschwindigkeiten der Spitze der flexiblen Fliegenrute 15
C3.2) Geschwindigkeiten der Spitze der absolut steifen Fliegenrute 16
C4) ERMITTLUNG DER BESCHLEUNIGUNGEN 19

D) ERMITTLUNG DER KRÄFTE 21

D1) AUF DIE SPITZE DER FLEXIBLEN FLIEGENRUTE WIRKENDE POTENTIELLE SPANNKRAFT 21
D2) AUF DIE SPITZEN BEIDER FLIEGENRUTEN WIRKENDE KRÄFTE 25
D3) KRÄFTE (MOMENTE) AM GRIFF DER FLIEGENRUTEN 26

E) EFFIZIENZ 28

E1) ENERGIE DER RUTENSPITZEN (NUTZEN) 28
E2) ARBEIT BZW. ENERGIE DER ROTATION (AUFWAND) 29
E3) EFFIZIENZ DER FLEXIBLEN UND ABSOLUT STEIFEN FLIEGENRUTE 31
E4) ÄNDERUNG DER EFFIZIENZ BEI SICH ÄNDERNDER BIEGUNG 32

F) WEITERE UNTERSUCHUNGEN 33

F1) EINFLUSS DES DREHIMPULSES 34
F2) EINFLUSS DER TRANSLATIONSBEWEGUNG 37
F2.1) Translationsbewegung der Wurfsequenz 37
F2.2) Reine Translationsbewegung der absolut steifen Fliegenrute 38

G) FAZIT UND SCHLUSSBETRACHTUNGEN 40

G1) UNSCHÄRFEN 40
G2) ZUSAMMENFASSUNG 40

DANKSAGUNG UND SCHLUSSWORTE 42

ANHANG 43

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Im Folgenden untersuche ich auf der Grundlage experimenteller Daten physikalisch / mathematisch, welchen Einfluss die Biegung der Fliegenrute auf den Wurf hat.

A) Grundlagen

Die Biegung der Fliegenrute wird anhand einer Wurfsequenz von mir aus dem Sommer 2012 analysiert, in welcher ich einen Leerwurf werfe. Sie wurde mit einer handelsüblichen digitalen Kamera aufgenommen, die 30 Einzelbilder pro Sekunde erzeugt. Die Einzelbilder meiner Wurfsequenz wurden anschließend mit einem Bildbearbeitungsprogramm ausgelesen.

Als Fliegenrute diente eine SAGE 586 RPL+ (2,65 m Länge) mit passender Schnur WF 5 F long belly.

Um den Einfluss der Biegung besser verstehen zu können, werden die Eigenschaften der verwendeten flexiblen Fliegenrute mit denen einer absolut steifen Fliegenrute verglichen[1]. Die untersuchten Fliegenruten besitzen damit folgende Eigenschaften:

1.) Die flexible Fliegenrute weist die Steifigkeit einer schnellen Rutenaktion auf, den Untersuchungen liegt eine Fliegenrute vom Typ SAGE 586 RPL+ (Schnurklasse 5, 2,65m Länge) zugrunde
2.) Die absolut steife Fliegenrute weist eine nahezu unendlich große Steifigkeit auf (E-Modul $\rightarrow \infty$), sie biegt sich während des Wurfes nicht durch.

Ein Vergleich beider Fliegenruten ist dann möglich, wenn sie mit der selben Winkelgeschwindigkeit (Rotationsgeschwindigkeit) geworfen werden. Dies wird in den folgenden Untersuchungen eingehalten.

Um die Untersuchungen in einem überschaubaren Rahmen halten zu können, muss ich zunächst einige Randbedingungen formulieren, die für beide Fliegenruten gleichermaßen gelten:

- Es wird die Rotationsbewegung der Fliegenrute betrachtet. Der Anteil der Translationsbewegung[2] wird vernachlässigt (da sie einen vergleichsweise geringen Anteil an der Steigerung der Geschwindigkeit hat).
- Beide Fliegenruten werden mit der selben Winkelgeschwindigkeit (Rotationsgeschwindigkeit) geworfen.
- Die Fliegenruten erhalten keine Masse.
- Das Abbremsen und Nachschwingen der Fliegenruten wird vernachlässigt.
- Die Anfangs- und Endstellung der Fliegenruten liegt bei ca. 40° und 140° bezogen auf die Horizontale.
- Es wird eine längere Fliegenschnur (ca. 22 Meter inklusive Vorfach) unter Anwendung des Doppelzuges geworfen.

[1] Die im Folgenden verwendeten Indizes „f“ und „s“ stehen für: „f“ = „flexible Fliegenrute“ und „s“ = „absolut steife Fliegenrute“.
[2] Auf die Translationsbewegung wird zum Ende der Untersuchungen hin gesondert eingegangen.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

- Die Rutenspitzen ziehen an der Masse m der gestreckten Fliegenschnur.
- Beide Fliegenruten besitzen die gleiche Länge L.

Die geometrischen und dynamischen Zahlenwerte werden für die drei Positionen 40°, 90° und 140° der Fliegenrute ermittelt und - sofern erforderlich - zwischen den Positionen interpoliert. Die Skizzen dienen der Visualisierung und sind nicht maßstabsecht. Über den gesamten Bearbeitungszeitraum habe ich darauf geachtet, die physikalischen Zusammenhänge möglichst einfach zu halten und darzustellen[3].

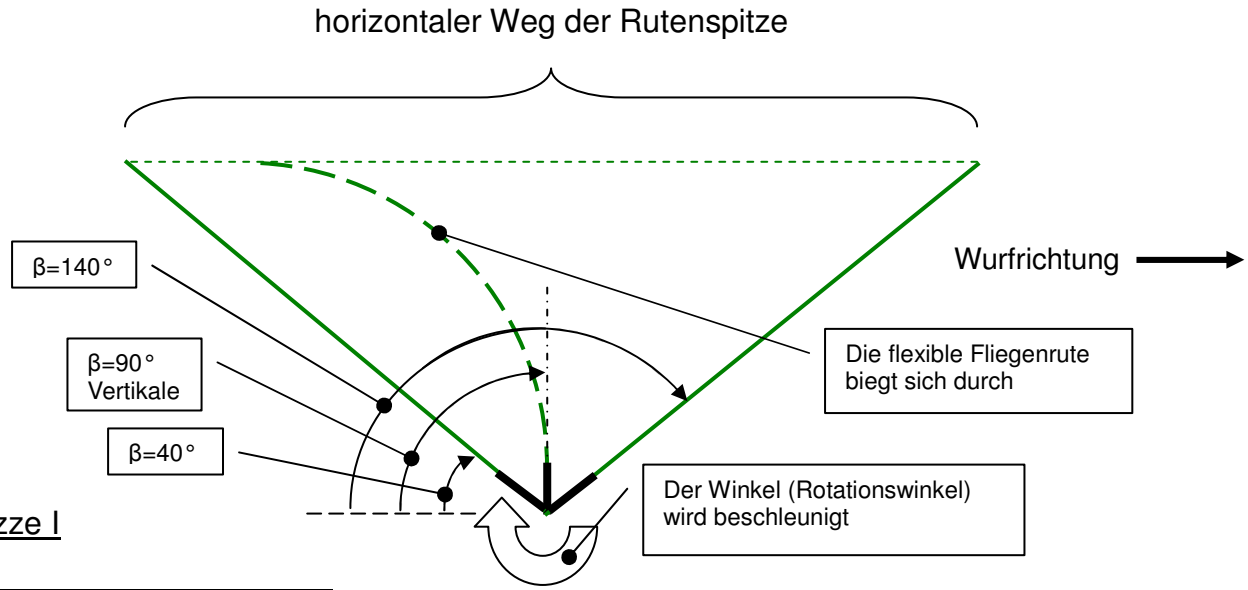
Die Ergebnisse der Untersuchungen beziehen sich auf eine analysierte Wurfsequenz von mir[4]. Sie sind experimentell ermittelt und dadurch mit Unschärfen behaftet. Auf die Unschärfen gehe ich am Ende der Untersuchungen noch näher ein – kann aber vorwegnehmen, dass die Feststellungen dadurch an sich nicht in Frage gestellt werden.

B) Geometrische Untersuchungen

In diesem Abschnitt untersuche ich die Geometrie (Wegebeziehung) näher, welche eine flexible und eine absolut steife Fliegenrute während des Wurfes beschreiben.

B1) Flexible Fliegenrute

Für die flexible Fliegenrute ergeben sich die nachfolgend dargestellten geometrischen Beziehungen:



Skizze I

[3] Auf Differential- und Integralrechnungen habe ich beispielsweise verzichtet. Die Werte werden für die jeweilige Momentaufnahme der Fliegenrute berechnet und stellen die Werte dar, die zu diesem Zeitpunkt in der Fliegenrute wirken. Effekte, die sich aus dem dynamischen Zusammenspiel der einzelnen Kräfte „aus der Bewegung heraus“ während des Wurfes ergeben, sind in den experimentell ermittelten Daten meines Wurfes enthalten und fließen deshalb in diese Momentaufnahme mit ein. Aus diesem Grunde ist davon auszugehen, dass diese Betrachtungsweise realistische Werte abbildet.

[4] Einzelbilder von Videoaufnahmen anderer Wurfsequenzen von mir zeigen ein nahezu identisches Biegeverhalten der Fliegenrute – obwohl ich in diesen Videoaufnahmen Fliegenruten mit schnellerer (SAGE TCR) und langsamerer Aktion werfe. Der Unterschied bestand im Wesentlichen in der unterschiedlichen Endgeschwindigkeit der Rutenspitzen.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Die flexible Fliegenrute biegt sich durch. Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass dabei der Weg der Rutenspitze annähernd eine Geraden beschreibt (siehe Skizze I).

***1. Feststellung:* Die Biegung der Fliegenrute hilft, dass die Spitze über ihren Weg annähernd eine Gerade fahren kann.**

B1.1) Biegeverhalten der flexiblen Fliegenrute

Für die anschließenden Untersuchungen muss die Position der Rutenspitze bestimmt werden. Dafür ist eine genauere Betrachtung des Biegeverhaltens der flexiblen Fliegenrute erforderlich. Meine Wurfsequenz soll darüber Aufschluss geben.

Biegung in der 90° Position (Vertikale)

Zur genaueren Bestimmung der Geometrie der Biegung der Fliegenrute werden zwei Einzelbilder meiner Wurfsequenz genauer betrachtet.

Diese beiden Bilder des Vorwärts- und Rückwurfes zeigen, dass in die Biegung der Fliegenrute gut ein Kreissegment gelegt werden kann. Die beiden Bilder zeigen auch, dass sich die Länge der gebogenen Fliegenrute einem Viertel des Kreisumfanges annähert, wenn der Rutengriff in etwa die vertikale 90° Position erreicht hat. Es gilt

$$U = \pi * d = 2 * \pi * r; L \cong \tfrac{1}{4} * U$$

mit U= Kreisumfang; d = Kreisdurchmesser; r = Kreisradius; L = Länge der Fliegenrute

Da die Länge L der Fliegenrute bei vertikaler 90° Position des Rutengriffs rd. einem Viertel des Kreisumfanges U entspricht, ergibt sich für den Radius

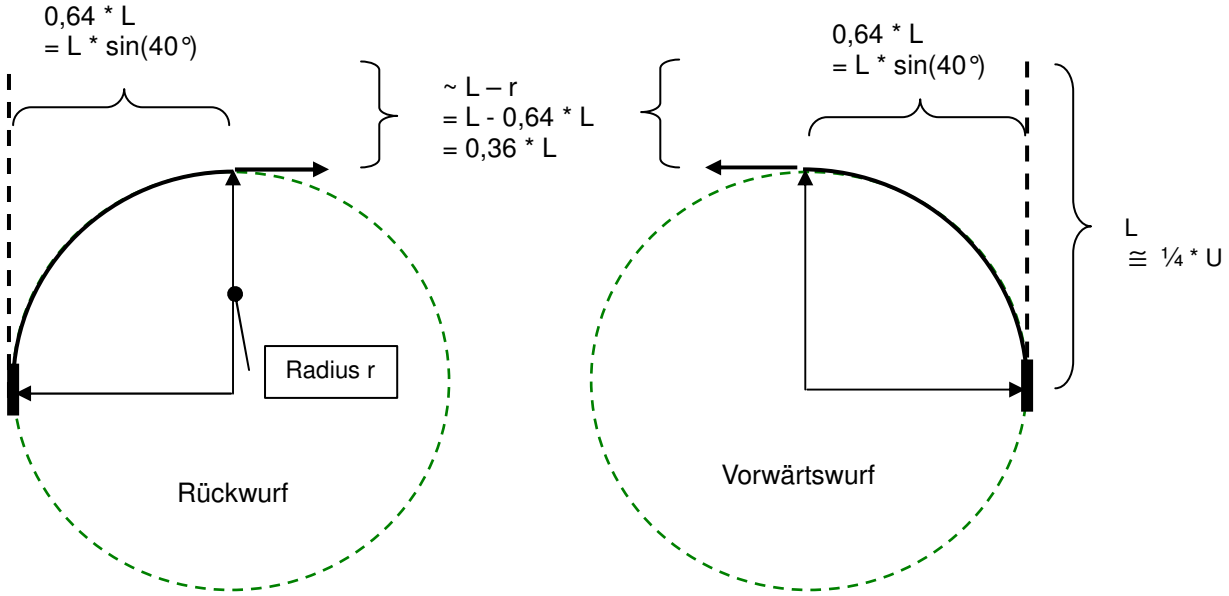
$$U = 4 * L = 2 * \pi * r \rightarrow r = \mathbf{0{,}64 * L}$$

Durch ihre Biegung verkürzt sich die Projektion der Fliegenrute auf die vertikale 90° Position um

$$L - r = L - 0{,}64 * L = \mathbf{0{,}36 * L}$$

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Die Skizze II zeigt die geometrischen Zusammenhänge der Biegung der Fliegenrute.



Skizze II

***2. Feststellung:* Durch die Biegung verkürzt sich die Projektion der Fliegenrute auf die vertikale 90° Position um rd. 1/3 (0,36*L).**

Biegung in der 140° Position (Endstellung)

Zur Bestimmung der Geometrie der Biegung der Fliegenrute werden wieder zwei Einzelbilder meiner Wurfsequenz genauer betrachtet.

Die Biegung der Fliegenrute ist in der Position 140° komplexer als die in der Position 90°. Sie nähert sich am ehesten der Form eines Ellipsensegments an und kann mit einer einfacheren Geometrie nicht mehr beschrieben werden. War die Biegung der Fliegenrute in der vertikalen 90° Position noch gleichmäßig über ihre Länge verteilt, so biegt sich nun die Fliegenrute in ihrem oberen Mittelabschnitt erheblich stärker als in ihren übrigen

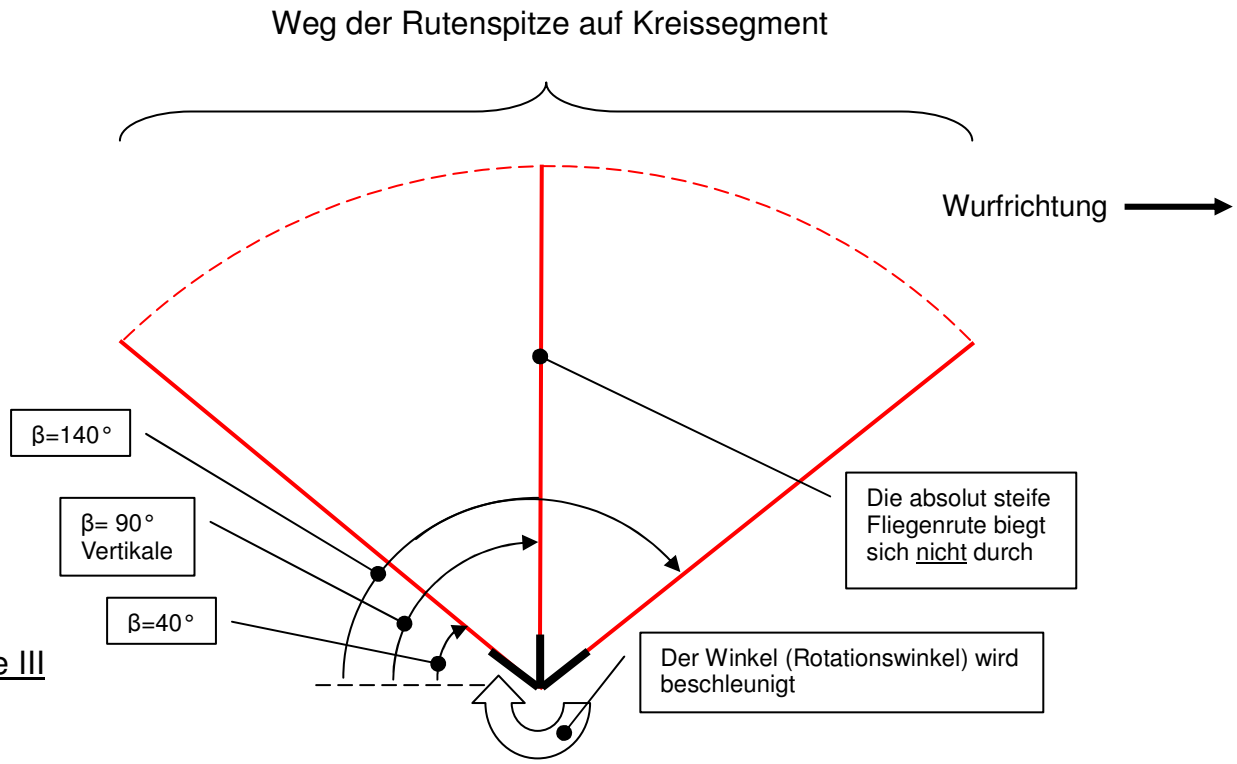
© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Abschnitten durch. Es fällt auf, dass sich die Rutenspitze
- weiterhin annähernd auf einer geraden Bahn und
- in etwa über meiner Mittelachse

befindet, wenn die Rutenhand die Endstellung (140° Position) erreicht hat.

B2) Absolut steife Fliegenrute

Für die absolut steife Fliegenrute ergeben sich die nachfolgend dargestellten geometrischen Beziehungen:



Skizze III

Die absolut steife Fliegenrute biegt sich - auch bei Krafteinwirkung - nicht durch. Der Weg der Rutenspitze beschreibt aus diesem Grunde einen konvexen Kreisbogen (siehe Skizze III)[5].

B3) Wege der Rutenspitzen

Der gesamte Rotationswinkel α beträgt während des Wurfes für beide Fliegenruten (flexibel / absolut steif)

$$\alpha = 140° - 40° = \mathbf{100°}$$

[5] Die absolut steife Fliegenrute kann innerhalb eines kleinen Rotationswinkels auch so geworfen werden, dass ihre Spitze einen geraden Anteil besitzt. Um Vergleichswerte zu erhalten, muss die Spitze der absolut steifen Fliegenrute in meinen Untersuchungen aber auf einem Kreissegment fahren.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

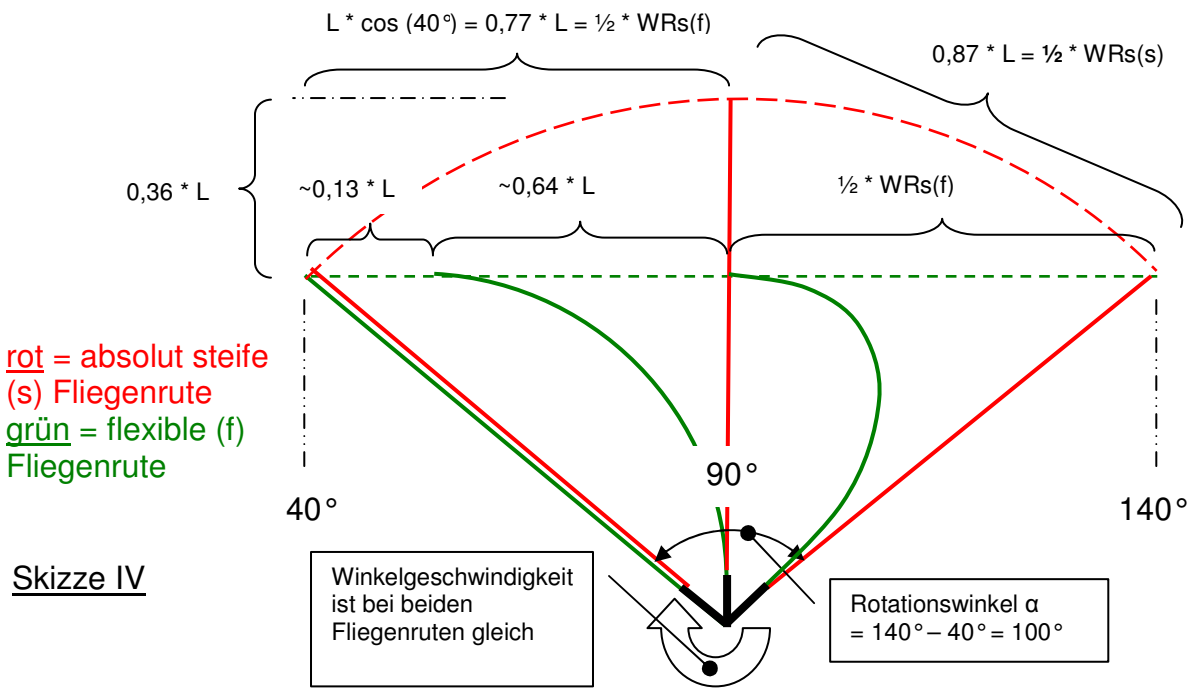
Der Weg der Spitze der flexiblen Fliegenrute entspricht

$$WRs(f) = 2 * L * \cos(40°) = 2 * 0{,}77 * L = \mathbf{1{,}54 * L}$$

Die Spitze der absolut steifen Fliegenrute beschreibt ein Kreisbogensegment, dessen Umfang sich aus der nachstehenden Formel ergibt

$$WRs(s) = L * \pi * \frac{\alpha(\deg)}{180°} = L * \pi * 0{,}555 = \mathbf{1{,}75 * L}$$

In Zusammenfassung der bisherigen Betrachtungen ergibt der Vergleich der flexiblen und der absolut steifen Fliegenrute die folgenden geometrischen Beziehungen (siehe Skizze IV):



Skizze IV

Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**40°**	**90° (Vertikale)**	**140° (Ende Rotation)**	**Summe Weg (ohne Rückstellung / Entladung)**
Zurückgelegter Weg der Spitze der flexiblen Fliegenrute	**0,0**	**(0,13- 0) * L = 0,13 * L**	**(0,77- 0,13) * L = 0,64 * L**	**(0,13+0,64) * L = 0,77 * L= ½ WRs(f)**
Zurückgelegter Weg der Spitze der absolut steifen Fliegenrute	**0,0**	**(0,87 - 0) * L = 0,87 * L = ½ WRs(s)**	**(1,75 - 0,87) * L = 0,87 * L = ½ WRs(s)**	**(0,87+0,87) * L =1,75 * L= WRs(s)**

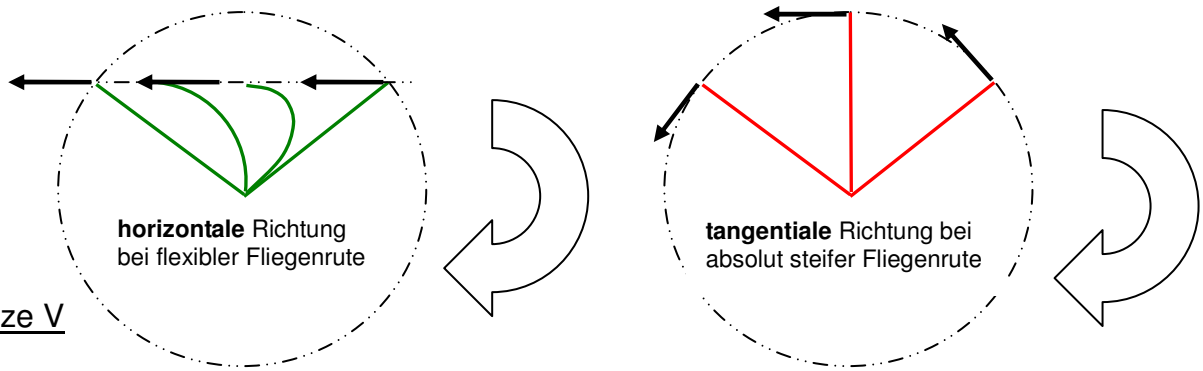
© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

B4) Wirkungsrichtungen

Die Winkelgeschwindigkeit, mit welcher der Rotationswinkel α geändert wird, nimmt bei der absolut steifen und flexiblen Fliegenruten im selben Maße zu. Allerdings übertragen die Spitzen der Fliegenruten die eingegebene Winkelgeschwindigkeit auf ihre Spitzen unterschiedlich.

B4.1) Richtung der Geschwindigkeit

Aufgrund ihrer Biegung zeigt die Spitze der flexiblen Fliegenrute zu Beginn des Wurfes über einen großen Teil ihres Weges in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur. Dadurch beschleunigt sie die Fliegenschnur vorwiegend in horizontaler Richtung. Hingegen zeigt die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zu keinem Zeitpunkt in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur, weil sie diese tangential beschleunigt (siehe Skizze V).



Skizze V

<u>3. Feststellung:</u> Die Spitze der flexiblen Fliegenrute zeigt über einen großen Teil ihres Weges in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur; sie beschleunigt diese in horizontaler Richtung. Die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zeigt zu keinem Zeitpunkt in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur; sie beschleunigt diese tangential auf einem Kreissegment.

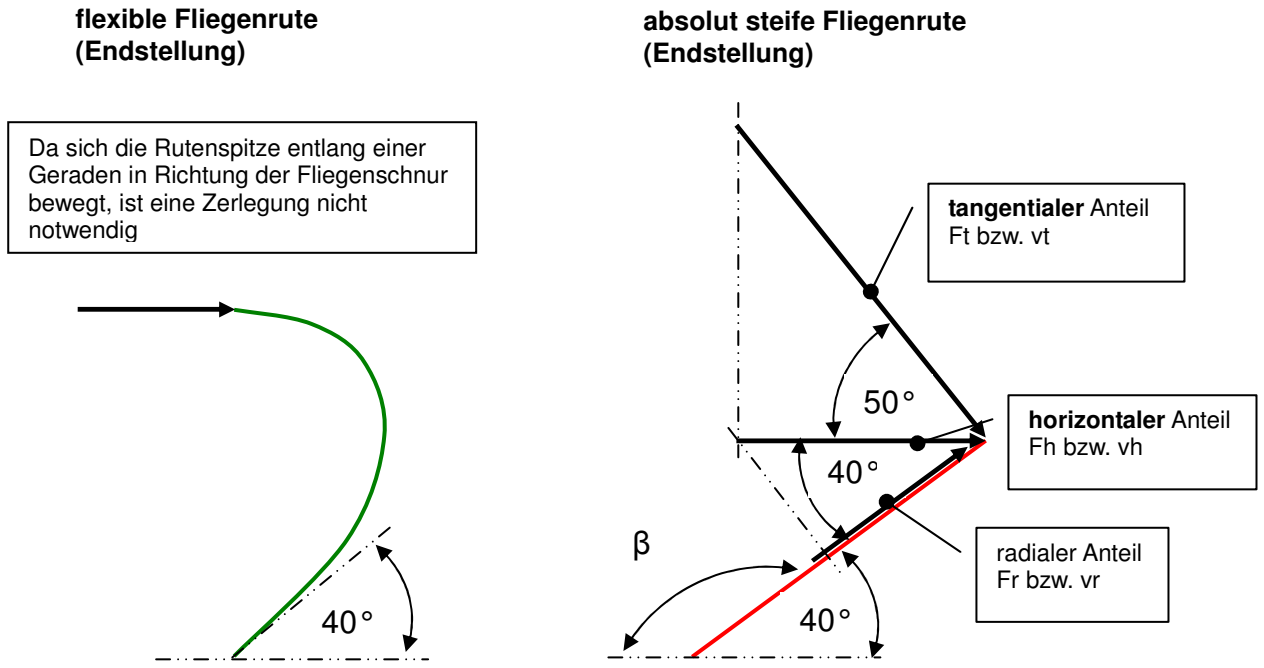
B4.2) Vektorielle Darstellung der Wirkungsrichtungen

Weil die Spitzen beider Fliegenrute die eingegebene Winkelgeschwindigkeit unterschiedlich auf die Fliegenschnur übertragen, ergeben sich unterschiedliche Wirkungsrichtungen.

Um die flexible und absolut steife Fliegenrute miteinander vergleichen zu können, müssen beide Fliegenruten nicht nur die selbe Winkelgeschwindigkeit besitzen, sondern auch ihre Spitzen die Fliegenschnur in die selbe Richtung werfen. An dieser Stelle wird die eingangs formulierte Randbedingung entsprechend präzisiert.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Die Fliegenschnur soll in horizontaler Richtung geworfen werden, so dass der horizontale Anteil der Geschwindigkeit maßgebend ist. Die Zusammenhänge zwischen den Anteilen bzw. Richtungen (Vektoren) der Geschwindigkeit werden in nachfolgender Skizze VI dargestellt:



Skizze VI

Bei der absolut steifen Fliegenrute verhält sich die tangentiale Geschwindigkeit zu der horizontalen wie folgt:

$$vh = \sin \beta * vt$$

In der Endstellung (140° Position) beträgt der horizontale Anteil

$$vh(140°) = \cos(50) * vt = \sin(140) * vt$$

Aus der vorgenannten vektoriellen Beziehung geht hervor, dass die Geschwindigkeiten beider Richtungen voneinander abhängen[6]. In der Endstellung (140° Position) beträgt der horizontale Anteil dann

$$vh(140°) = \sin(140) * vt = \mathbf{0{,}643 * vt}$$

4. Feststellung:* Bei einem Rotationswinkel α von 100° reduziert sich bei der absolut steifen Fliegenrute in der Endstellung der horizontale Anteil der Geschwindigkeit der Spitze um den Faktor 0,643. Je größer der Rotationswinkel α wird, desto kleiner wird dieser Faktor und damit auch der horizontale Anteil, den die absolut steife Fliegenrute aufbringen kann.

[6] Und der horizontale Anteil der Geschwindigkeit kann nie größer als der tangentiale werden.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

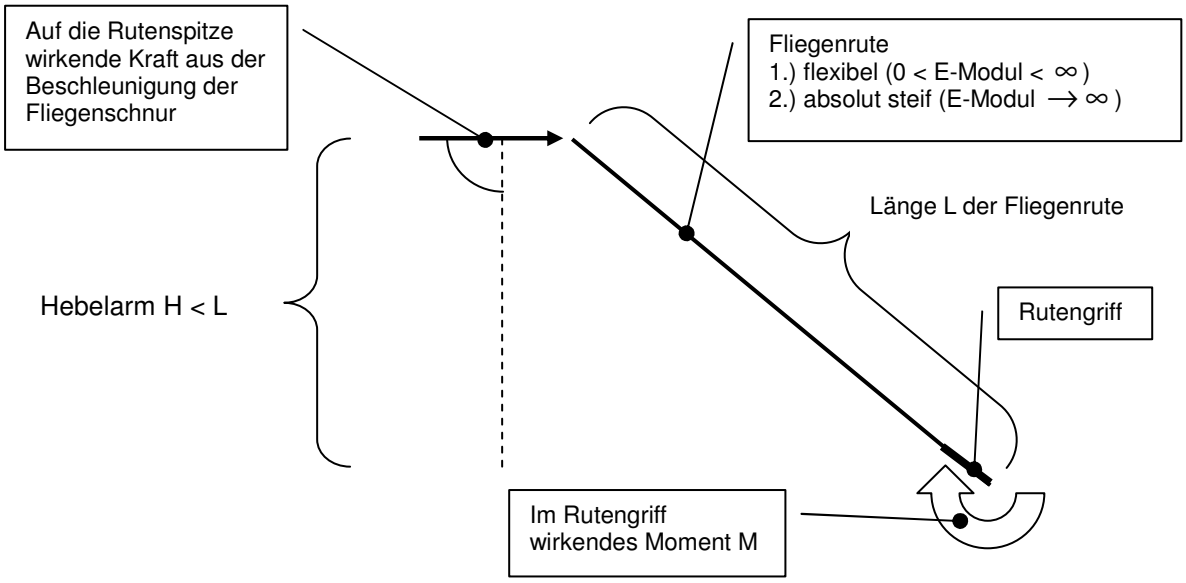
Es ist also von Vorteil, wenn der horizontale Anteil der Geschwindigkeit möglichst hoch ist. Bei der absolut steifen Fliegenrute kann dies nur erreicht werden, wenn der Rotationswinkel α so klein wie möglich gehalten wird.

B4.3) Hebelarm

Wird der Rotationswinkel α geändert, zieht die Spitze der Fliegenrute an der Fliegenschnur (Masse), wodurch im Rutengriff ein Moment wirkt. Dieses Moment kann mit der Formel

Moment = Kraft * Hebelarm

berechnet werden. Dabei ist der Hebelarm der flexiblen Fliegenrute über den gesamten Weg der Rutenspitze annähernd konstant und entspricht dem Radius des Kreissegments r = Hf = 0,64 * L (siehe Abschnitt B1.1). Bei der absolut steifen Fliegenrute ändert sich der Hebelarm über den Weg der Rutenspitze und entspricht in der vertikalen 90° Position der Rutenlänge L.



Skizze VI

Die Momente werden später bei den Ermittlungen der vom Werfer aufzuwendenden Kraft berechnet.

C) Dynamische Untersuchungen

In diesem Abschnitt untersuche ich die Dynamik (zeitabhängige Beziehung) näher, welche die flexible und die absolut steife Fliegenrute während des Wurfes beschreiben.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

C1) Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung

Im Gegensatz zur absolut steifen Fliegenrute beeinflusst die Biegung der flexiblen Fliegenrute den Verlauf des Wurfs zusätzlich.

Die Einzelbilder meiner Wurfsequenz legen nahe, dass folgende Anzeichen für den Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung charakteristisch sind:

- Der gerade Anteil des unteren, starken Abschnitts in Griffnähe der Fliegenrute vergrößert sich. Der sich biegende Teil der Fliegenrute wird kleiner und verlagert sich zunehmend in die Spitze der Fliegenrute.
- Die Rutenhand hat die Rotationsbewegung abgeschlossen und folgt ggf. nur noch etwas in Wurfrichtung nach

Werden die Einzelbilder meiner Wurfsequenz auf die vorgenannten Anzeichen hin untersucht, dann beginnt die Rückstellung / Entladung bzw. der Stopp der Fliegenrute in etwa zu dem Zeitpunkt, wenn ihre Spitze die Hälfte ihres Weges zurückgelegt hat (siehe Bild 3). Die nachfolgenden fünf Einzelbilder (ein Bild pro 1/30 Sekunde) zeigen den Vorwärtswurf um den Zeitpunkt des Beginns herum:

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

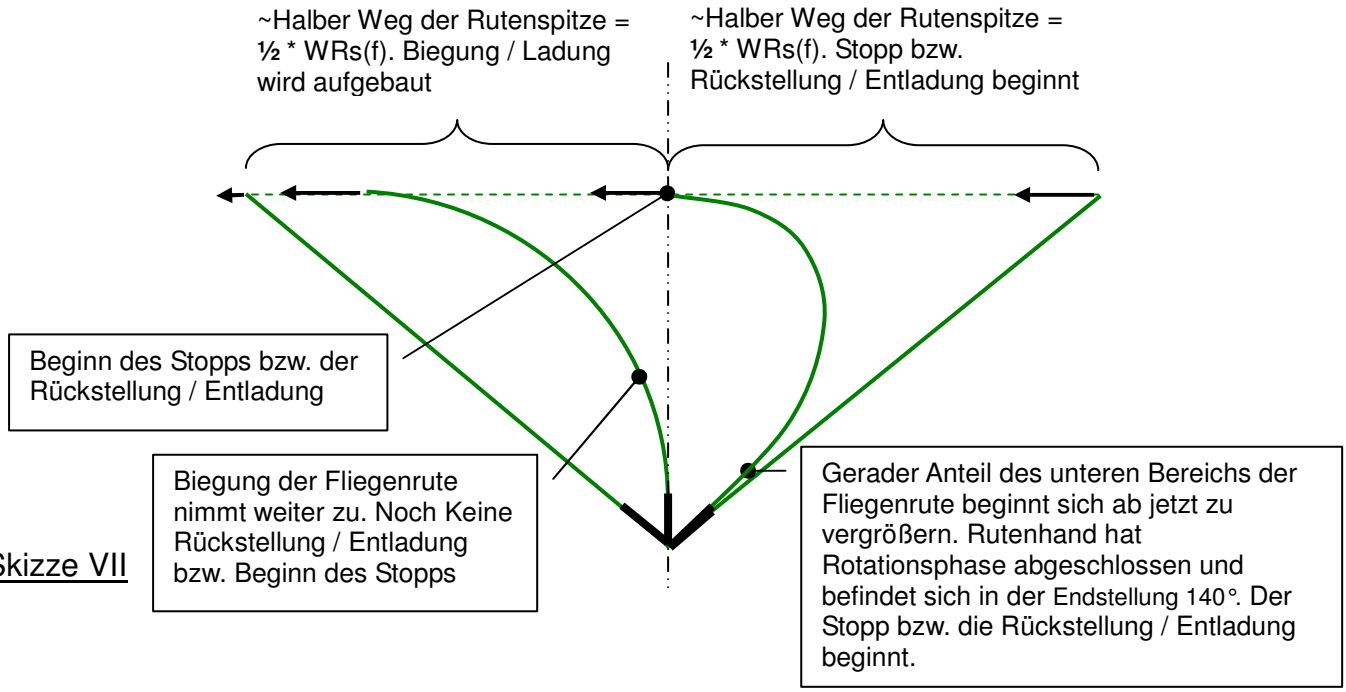
Gleiches kann für meinen Rückwurf angenommen werden, da der Wurfablauf und das Biegeverhalten in beide Richtungen nahezu identisch ist.

<u>5. Feststellung:</u> Der Stopp bzw. die Rückstellung / Entladung der flexiblen Fliegenrute beginnt, wenn ihre Spitze in etwa die Hälfte (~50%) ihres Weges (aus Rotation) zurückgelegt hat. Die Rutenhand hat dann gerade die Endstellung 140° erreicht[7].

Nachfolgende Skizze VII verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung und der Position der Rutenspitze.

[7] Schon allein die Tatsache, dass sich die Rückstellung / Entladung in etwa über die Hälfte des Wurfweges ereignet zeigt, dass die Biegung nicht vernachlässigt werden darf. Unabhängig von den weiteren Feststellungen kann hier schon gesagt werden, dass der Werfer nicht nur den Aufbau der Biegung, sondern auch ihren Abbau (Rückstellung / Entladung) über einen langen Weg der Rutenspitze kontrollieren muss.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.



Skizze VII

C2) Weg-Zeit -Beziehungen aus der Bildabfolge der Wurfsequenz

Mit den unter Abschnitt B ermittelten geometrischen Beziehungen und der Bildabfolge können nun den einzelnen Positionen, welche die Rutenspitze über ihren Weg einnimmt, den Zeitpunkten zugeordnet werden. Dafür wird im Folgenden die Bildabfolge meines Vorwärtswurfes herangezogen, der zeitliche Abstand der Bilder zueinander beträgt 1/30 Sekunde. Weil der Wurfablauf und das Biegeverhalten meines Vorwärtswurfes und meines Rückwurfes nahezu identisch sind, gelten die ermittelten Werte für meinen Rückwurf gleichermaßen.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Bild 1-3

Bild 4-6

Bild 8:~Vertikale Position 90°

Bild 10:~Beginn Rückstellung 140°

Im letzten, 13. Bild ist Wurf bereits abgeschlossen. Dafür sprechen folgende Anzeichen:

- im vorangehenden 12. Bild ist die Fliegenrute bereits fast entspannt, nur das oberste Spitzenteil biegt sich noch leicht durch
- die Bahn der Rutenspitze ist abwärtsgerichtet

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

- die Rute ist soeben durch ihre entspannte Ruhestellung geschwungen
- die Fliegenschnur beginnt eine Schlaufe auszubilden

Daher wird das letzte Bild nicht mehr für die Wurfdauer berücksichtigt[8].

Die aus der Bildabfolge berechneten Zeiten sind in der nachstehenden Tabelle dargestellt:

Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**90°**	**140°**	**Rückstellung/ Entladung/Stopp bis Ruhestellung**
Anzahl Bilder bis Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff erreicht wird	**8**	**10**	**~12**
Zeit insgesamt (Dauer)	**8 / 30 = 0,2666s**	**10 / 30 = 0,3333s**	**12 / 30 = 0,40s**
Differenzen	**40° bis 90°**	**90° bis 140°**	**von Beginn bis Ende Rückstellung / Entladung**
Zeit Δt (bei 30 Bilder pro Sekunde) zwischen den Position / Stellung	**Δt = (8-0)/30 = 0,2666s**	**Δt = (10-8)/30 = 0,0666s**	**Δt = (12-10)/30 = 0,0666s**

***6. Feststellung:* Die Spitzen beider Fliegenruten brauchen unterschiedlich lange, um ihre horizontale Endgeschwindigkeit zu erreichen. Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dauert der Wurf der flexiblen Fliegenrute rd. 0,0666 Sekunden (um die Dauer der Rückstellung / Entladung) länger als der Wurf mit der absolut steifen Fliegenrute.**

C3) Ermittlung der Geschwindigkeiten aus der Bildabfolge

Über die Einzelbilder meiner Wurfsequenz berechnet sich die Geschwindigkeit v der Rutenspitze samt der gestreckten Fliegenschnur wie folgt:

$$v = \frac{\Delta Weg}{\Delta Zeit} = \frac{\Delta w}{\Delta t}$$

Die so berechnete Geschwindigkeit entspricht der mittleren Geschwindigkeit, welche die Rutenspitze zwischen den Positionen 40° bis 90° sowie 90° bis 140° besitzt. Für die Berechnung wurde beispielhaft mein Vorwärtswurf ausgewählt, mein Rückwurf würde eine vergleichbare Bildabfolge liefern.

C3.1) Geschwindigkeiten der Spitze der flexiblen Fliegenrute

In der nachfolgenden Tabelle werden die Geschwindigkeiten der Spitze der flexiblen Fliegenrute berechnet.

[8] Bei Berücksichtigung des letzten, 13. Bildes für die Wurfdauer würden sich außerdem Zahlenwerte ergeben, die nicht die Wirklichkeit abbilden. Beispielweise würde die Geschwindigkeit während der Rückstellung / Entladung abnehmen. Dies hätte zur Folge, dass sich die Schlaufe schon während der Rückstellung / Entladung ausbildet, was aber nicht zutrifft.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**90°**	**140°**	**Rückstellung/ Entladung/Stopp bis Ruhestellung**
Zurückgelegter Weg der Rutenspitze (flexibel)	**0,13 * L**	**0,77 * L**	**1,54 * L**
Differenzen	**40° bis 90°**	**90° bis 140°**	**von Beginn bis Ende Rückstellung / Entladung**
Geschwindigkeit vf der Rutenspitze Δw/Δt	**vf = (0,13-0,00)L /0,2666s = 0,487L/s**	**vf = (0,77-0,13)L /0,0666s = 9,61L/s**	**vf = (1,54-0,77)L /0,0666s = 11,56L/s**

C3.2) Geschwindigkeiten der Spitze der absolut steifen Fliegenrute

Für die selbe Bildabfolge werden in der nachfolgenden Tabelle die Geschwindigkeiten der Spitze der absolut steifen Fliegenrute berechnet[9]. Der horizontale Anteil vs,h ergibt sich nach Abschnitt B4.2)

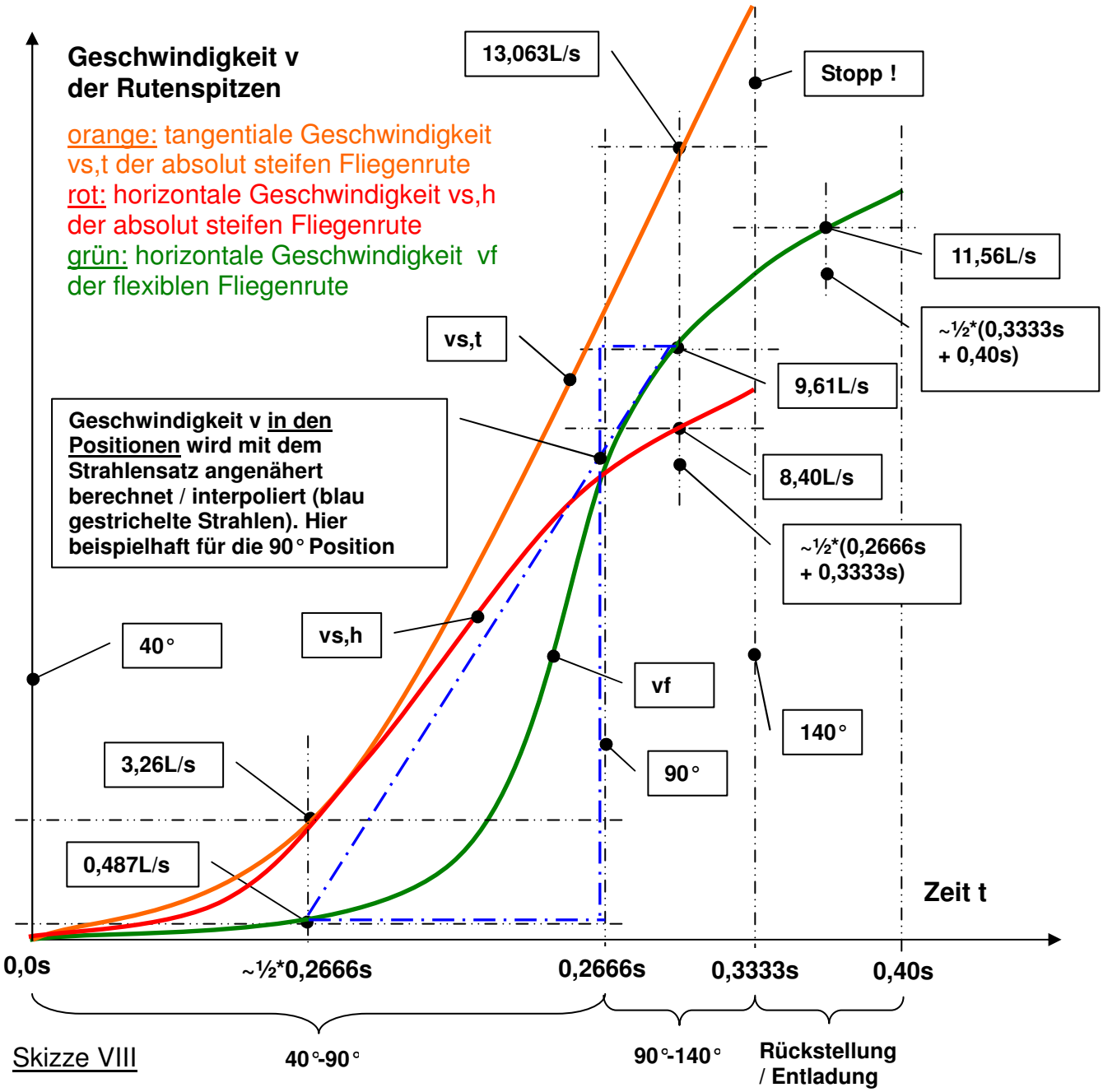
Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**90°**	**140°**	**Rückstellung/ Entladung/Stopp bis Ruhestellung**
Zurückgelegter Weg der Rutenspitze (absolut steif)	**0,87 * L**	**1,75 * L**	**trifft nicht zu**
Differenzen	**40° bis 90°**	**90° bis 140°**	**von Beginn bis Ende Rückstellung / Entladung**
<u>Tangentiale</u> Geschwindigkeit vs,t der Rutenspitze	**vs,t = (0,87-0,00)L /0,2666s = 3,26L/s**	**vs,t = (1,75-0,87)L /0,0666s=13,063L/s**	**trifft nicht zu**
<u>Horizontale</u> Geschwindigkeit vs,h der Rutenspitze	**vs,h=vs,t*sin(90) =3,26L/s * 1,00 = 3,26L/s**	**vs,h=vs,t*sin(140) = 13,063L/s * 0,643 = 8,40L/s**	**trifft nicht zu**

Die nachfolgende Skizze VIII zeigt die Verläufe der Geschwindigkeiten der Spitzen beider Fliegenruten[10].

[9] Durch die Verwendung der selben Bildabfolge wird sichergestellt, dass beide Fliegenruten die selbe Winkelgeschwindigkeit besitzen.

[10] Die innerhalb der Positionen 40° bis 90° und 90° bis 140° liegenden, mittleren Geschwindigkeiten werden für die weiteren Betrachtungen dem mittleren Zeitpunkt zugeordnet, also: v(40°-90°) ≈ ½ * (0,2666s+0,00s), v(90°-140°) ≈ ½ * (0,2666s+0,3333s) und v(Rückstellung / Entladung) ≈ ½ * (0,3333s+0,40s). Der ermittelte Verlauf der Winkelgeschwindigkeit meiner Wurfsequenz weicht insbesondere zu Beginn des Wurfes vom linearen ab, weshalb die gewählte zeitliche Zuordnung nicht ganz exakt ist. Die vorgenannte zeitliche Zuordnung wird der Einfachheit halber vorgenommen, weil eine genauere Ermittlung aufwendig wäre und in keinem Verhältnis zum Fehler stünde, der für die angestellten Untersuchungen als vernachlässigbar angesehen wird - auch weil er sich beim Vergleich beider Fliegenruten wahrscheinlich neutralisiert.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.



Skizze VIII

Die Geschwindigkeiten direkt in den Positionen 90°, 140° und am Ende der Rückstellung / Entladung werden im Folgenden gut angenähert über den Strahlensatz[11] ermittelt.

[11] Auch Vierstreckensatz genannt. http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlensatz. Für das Beispiel 90° ergibt sich eine Strahlengleichung von
(½ t(40° bis 90°) + ½ t(90° bis 140°)) : (v(90° bis 140°) - v(40° bis 90°)) = ½ t(40° bis 90°) : (**v(90°)**-v(40° bis 90°))

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Für die Spitze der flexiblen Fliegenrute ergibt sich die horizontale Geschwindigkeit vf zu:

$$\frac{0{,}5*((0{,}2666-0)+(0{,}3333-0{,}2666))}{(9{,}61-0{,}487)} = \frac{0{,}5*0{,}2666}{vf(90°)-0{,}487}$$

→ vf(90°) = $\frac{0{,}5*0{,}2666*9{,}123}{0{,}1666}$ + 0,487= 7,30 + 0,487 = **7,787** L/s

$$\frac{0{,}5*((0{,}3333-0{,}2666)+(0{,}40-0{,}3333))}{(11{,}56-9{,}61)} = \frac{0{,}5*(0{,}3333-0{,}2666)}{vf(140°)-9{,}61}$$

→ vf(140°) = $\frac{0{,}5*0{,}0666*1{,}95}{0{,}0666}$ + 9,61= 0,975 + 9,61 = **10,585** L/s

$$\frac{0{,}5*(0{,}40-0{,}3333)}{(11{,}56-10{,}585)} = \frac{0{,}5*(0{,}40-0{,}3333)}{vf(end)-11{,}56}$$

→ vf(end) = $\frac{0{,}5*0{,}0666*0{,}975}{0{,}0333}$ + 11,56= 0,975 + 11,56 = **12,535** L/s

Für die Spitze der absolut steife Fliegenrute ergibt sich die horizontale Geschwindigkeit vs,h zu:

$$\frac{0{,}5*((0{,}2666-0)+(0{,}3333-0{,}2666))}{(8{,}40-3{,}26)} = \frac{0{,}5*0{,}2666}{vs,h(90°)-3{,}26}$$

→ vs,h(90°) = $\frac{0{,}5*0{,}2666*5{,}14}{0{,}1666}$ + 3,26= 4,113 + 3,26 = **7,373** L/s

$$\frac{0{,}5*((0{,}3333-0{,}2666)+(0{,}40-0{,}3333))}{(8{,}40-7{,}373)} = \frac{0{,}5*(0{,}3333-0{,}2666)}{vs,h(140°)-8{,}40}$$

→ vs,h(140°) = $\frac{0{,}5*0{,}0666*1{,}027}{0{,}0333}$ + 8,40= 1,027 + 8,40 = **9,427** L/s = vs,h(end)

Der Vergleich der Endgeschwindigkeiten v(end) und der Anfangsgeschwindigkeiten v(40-90) der Spitzen beider Fliegenruten ergibt

vf(end) / vs,h(end) = 12,53 / 9,43 = **1,33**

vf(40°-90°) / vs,h(40°-90°) ≈ 0,487 / 3,26 = **0,15**

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

***7. Feststellung:* Die Spitze der flexiblen Fliegenrute besitzt eine um ca. 33 % höhere horizontale Endgeschwindigkeit als die Spitze der absolut steifen Fliegenrute. Hingegen bewegt sich die Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute zu Beginn des Wurfes nur um 15% der Geschwindigkeit, welche die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zu diesem Zeitpunkt bereits besitzt (Anfangsgeschwindigkeit)[12].**

Der Vergleich der Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute zu Beginn und am Ende des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung ergibt

vf(140°) / vf(end) = 10,585 / 12,535 = **0,84**

***8. Feststellung:* Die Spitze der flexiblen Fliegenrute besitzt zu Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung gut 80% ihrer Endgeschwindigkeit[13].**

C4) Ermittlung der Beschleunigungen

Die Beschleunigung a ist definiert als Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit[14]. Mit den zuvor berechneten Geschwindigkeiten kann nun die Beschleunigung abschnittsweise berechnet werden.

$$a = \frac{\Delta Geschwindigkeit}{\Delta Zeit} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Für die Spitze der flexiblen Fliegenrute ergibt sich die Beschleunigung af zu:

$$af1 = a(40°\text{-}90°) = \frac{0{,}487 - 0}{0{,}5 * (0{,}2666 - 0)} \frac{L}{s^2} = \frac{0{,}487}{0{,}1333} = \mathbf{3{,}65} \frac{L}{s^2}$$

$$af2 = a(90°) = \frac{9{,}61 - 0{,}487}{0{,}5 * ((0{,}2666 + 0{,}3333) - 0{,}2666)} \frac{L}{s^2} = \frac{9{,}123}{0{,}1666} = \mathbf{54{,}76} \frac{L}{s^2}$$

[12] Die flexible Fliegenrute setzt die eingegebene Winkelgeschwindigkeit zeitverzögert in die Geschwindigkeit der Rutenspitze um. Die zu Beginn des Wurfes eingegebene Winkelgeschwindigkeit geht fast vollständig in die Biegung der Fliegenrute (was einen deutlichen Anstieg der potentiellen Spannkraft zur Folge hat) und nicht in die Zunahme der Geschwindigkeit der Rutenspitze ein. Wenn sich der Rutengriff in etwa in der vertikalen 90° Position befindet, hat die Spitze der flexiblen Fliegenrute die horizontale Geschwindigkeit der Spitze der absolut steifen Fliegenrute erreicht und steigert ihre Geschwindigkeit weiter. Schließlich besitzt die Spitze der flexiblen Fliegenrute am Ende des Wurfes eine deutlich größere horizontale Geschwindigkeit als die Spitze der absolut steifen Fliegenrute.

[13] Dass die Spitze der flexiblen Fliegenrute zu Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung ihrer Endgeschwindigkeit nahekommt, wird gerne als Argument dafür verwendet, die Bedeutung ihrer Biegung für den Fliegenwurf gering zu schätzen. Diese Ansicht berücksichtigt nicht, dass gerade wegen der Biegung die Spitze der flexiblen Fliegenrute eine deutlich höhere horizontale Endgeschwindigkeit als die Spitze der absolut steifen Fliegenrute erreicht und dass die flexible Fliegenrute die Geschwindigkeit der Rutenspitze über ihren Weg anders verteilt (siehe 7. Feststellung !). Der unterschiedlichen Verteilung der Geschwindigkeit auf die Rutenspitzen wird bei der Betrachtung der Effizienz noch eine größere Aufmerksamkeit zu schenken sein.

[14] Die Beschleunigung entspricht der 1. Ableitung der Geschwindigkeit: a = v'.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

$$af3 = a(90°\text{-}140°) = \frac{10{,}585 - 7{,}787}{0{,}3333 - 0{,}2666}\ \frac{L}{s^2} = \frac{2{,}796}{0{,}0666} = \mathbf{41{,}98}\frac{L}{s^2}$$

$$af4 = a(140°) = \frac{11{,}56 - 9{,}61}{0{,}5 * ((0{,}3333 + 0{,}40) - (0{,}2666 + 0{,}3333))}\ \frac{L}{s^2} = \frac{1{,}95}{0{,}0666} = \mathbf{29{,}23}\frac{L}{s^2}$$

$$af5 = a(rück) = \frac{12{,}535 - 10{,}585}{0{,}40 - 0{,}3333}\ \frac{L}{s^2} = \frac{1{,}95}{0{,}0666} = \mathbf{29{,}23}\frac{L}{s^2}$$

Für die Spitze der absolut steifen Fliegenrute ergibt sich die Beschleunigung[15] as zu:

$$as1 = a(40°\text{-}90°) = \frac{3{,}26 - 0}{0{,}5 * (0{,}2666 - 0)}\ \frac{L}{s^2} = \frac{3{,}26}{0{,}1333} = \mathbf{24{,}45}\frac{L}{s^2}$$

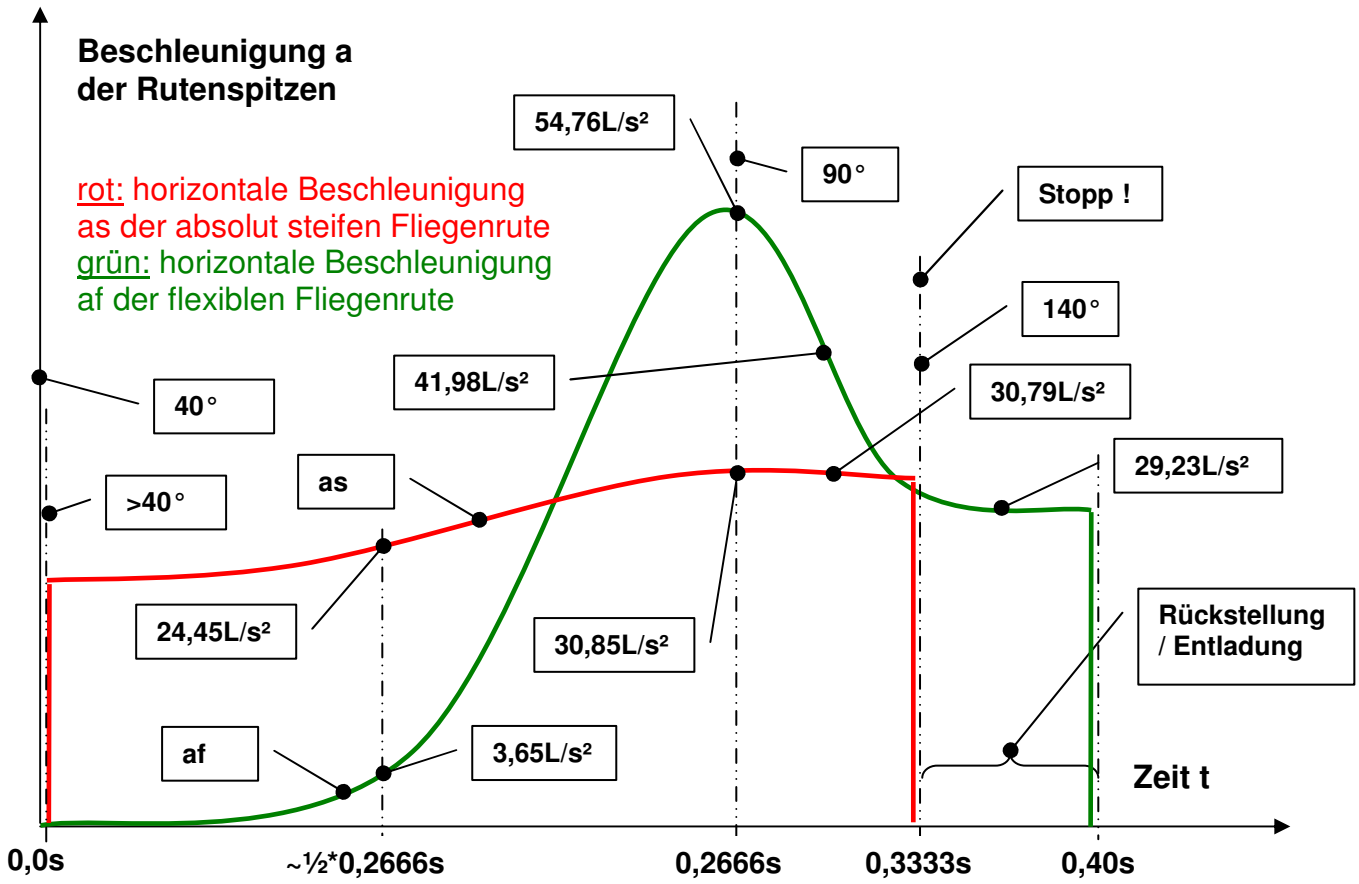
$$as2 = a(90°) = \frac{8{,}40 - 3{,}26}{0{,}5 * ((0{,}2666 + 0{,}3333) - 0{,}2666)}\ \frac{L}{s^2} = \frac{5{,}14}{0{,}1666} = \mathbf{30{,}85}\frac{L}{s^2}$$

$$as3 = a(90°\text{-}140°) = \frac{9{,}427 - 7{,}373}{0{,}3333 - 0{,}2666}\ \frac{L}{s^2} = \frac{2{,}054}{0{,}0666} = \mathbf{30{,}79}\frac{L}{s^2}$$

Die nachfolgende Skizze IX zeigt die Verläufe der Beschleunigungen der Spitzen beider Fliegenruten:

[15] Im Folgenden wird auf den Index „h“ für „horizontal“ verzichtet. Alle Beschleunigungen a beziehen sich auf die horizontale Richtung .

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.



Skizze IX

D) Ermittlung der Kräfte

In diesem Abschnitt untersuche ich die Kräfte näher, welche beim Wurf mit der flexiblen und der absolut steifen Fliegenrute wirken. Für die Berechnung der Kräfte kommt das 2. Newton'sche Gesetz zur Anwendung:

Kraft = Masse * Beschleunigung; F = m * a

Die Masse m entspricht dem Gewicht der gestreckten Fliegenschnur, an welcher die Rutenspitze zieht.

D1) Auf die Spitze der flexiblen Fliegenrute wirkende potentielle Spannkraft

Durch die Rotation ihrer eigenen Masse und den Zug an der Fliegenschnur (Masse m) erfährt die flexible Fliegenrute eine Biegung. Die Biegung ist unter Abschnitt B1.1 ermittelt worden. Für die weitere Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Rutenspitze zum mittleren Zeitpunkt innerhalb

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

- der 40° bis 90° Position (~65°) noch keinen bzw. einen vernachlässigbar kleinen Weg und
- der Rückstellung / Entladung den halben Weg

zurückgelegt hat.

Beide Annahmen stimmen mit der Bildabfolge unter Abschnitt C2 gut überein. Damit ergeben sich die in der folgenden Tabelle aufgeführten Auslenkungen der Spitze der flexiblen Fliegenrute:

Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**40° bis 90° ~½ Dauer**	**90°**	**140°**	**~½ Dauer Rückstellung/ Entladung/ bzw. Stopp**	**~ volle Dauer Rückstellung/ Entladung/ bzw. Stopp**
Zurückgelegter Weg der Rutenspitze (WRs) mit Biegung	**~0,0L**	**0,13L**	**0,77L**	**~(0,77+0,5*0,77)*L = 1,155L**	**1,54 L**
Zurückgelegter Weg der Spitze in der Rutenachse (ohne Biegung)	**~0,5*0,77L = 0,385L**	**0,77 L**	**1,54 L**	**1,54 L**	**1,54 L**
Differenz = Auslenkung x = Biegung	**0,385 L**	**0,64 L**	**0,77 L**	**0,385 L**	**0,0 L**
Differenz der Auslenkung Δx = Änderung der Biegung	**(0,385-0)*L = 0,385 L**	**(0,64-0,385)*L = 0,255 L**	**(0,77-0,64)*L = 0,13 L**	**(0,385-0,77)*L = -0,385 L**	**(0-0,385)*L = -0,385 L**

***9. Feststellung:* Die Auslenkung ist ein Maß für die Biegung der Fliegenrute. Sie nimmt über die 90° Position hinaus zu. Jeder in die Rotationsbewegung eingegebene Weg (Änderung des Rotationswinkels) führt zu einer Steigerung der Biegung der Fliegenrute.**

Über den Weg der Rückstellung / Entladung wird die wegen der Biegung in der Fliegenrute gespeicherte potentielle Energie[16] vollständig in kinetische Energie umgewandelt, weil der Werfer die Fliegenrute nicht weiter rotiert und damit keine weitere Energie bzw. Arbeit eingibt. Da die Geschwindigkeiten zu Beginn und am Ende der Rückstellung / Entladung bekannt sind, kann die potentielle Energie berechnet werden.

$$E_{pot,(rück)} = \tfrac{1}{2} * m * vf(end)^2 - \tfrac{1}{2} * m * vf(140)^2$$

$$= \tfrac{1}{2} * m * \left(12{,}535^2 \frac{L^2}{s^2} - 10{,}585^2 \frac{L^2}{s^2}\right) = \mathbf{22{,}54}\ \frac{m * L^2}{s^2}$$

Um die potentielle Spannkraft zu erhalten, muss die Energie durch den zurückgelegten Weg dividiert werden:

[16] Hier ist es richtig, die Energie E = ½ m v² zu betrachten, um auf den Grundsatz der Energieerhaltung einzugehen. Die Energie, welche die Fliegenrute bei ihrer Rückstellung / Entladung freigibt, muss zuvor vom Werfer aufgebracht worden sein.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Fpot,5 = F(rück) = Epot,(rück) / Weg = 22,54 / 0,77L = **29,27** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fpot,gesamt

Diese über die Rückstellung / Entladung wirkende Spannkraft muss der Werfer zuvor aufbringen. Sie lässt sich über die bekannten Auslenkungen x bzw. Δx annähernd gut verteilen.

Bis zum Beginn der Rückstellung / Entladung ergibt sich:

Fpot,1 = 0,385L/0,77L * 29,27 = **14,63** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fpot(40°-90°)

ΔFpot,1 = 0,385L/0,77L * 29,27 = **14,63** $\frac{m*L}{s^2}$

Fpot,2 = 0,64L/0,77L * 29,27 = **24,33** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fpot(90°)

ΔFpot,2 = 0,255L/0,77L * 29,27 = **9,69** $\frac{m*L}{s^2}$

Fpot,3 = 0,77L/0,77L * 29,27 = **29,27** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fpot(90°-140°)

ΔFpot,3 = 0,13L/0,77L * 29,27 = **4,94** $\frac{m*L}{s^2}$

Fpot,4 = 0,77L/0,77L * 29,27 = **29,27** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fpot(140°)

ΔFpot,4 ≈ 0,00L/0,77L * 29,27 ≈ **0,00** $\frac{m*L}{s^2}$

Mit Beginn der Rückstellung / Entladung ergibt sich[17]:

Fpot(rück,anf) = 0,77L/-0,77L * 29,27 = **-29,27** $\frac{m*L}{s^2}$

ΔFpot(rück,anf) ≈ 0,00L/-0,77L * 29,27 = **0,00** $\frac{m*L}{s^2}$ ≈ ΔFpot(140°)

Fpot(rück,mitte) = 0,385L/-0,77L * 29,27 = **-14,63** $\frac{m*L}{s^2}$

ΔFpot(rück,mitte) = -0,385L/-0,77L * 29,27 = **14,63** $\frac{m*L}{s^2}$

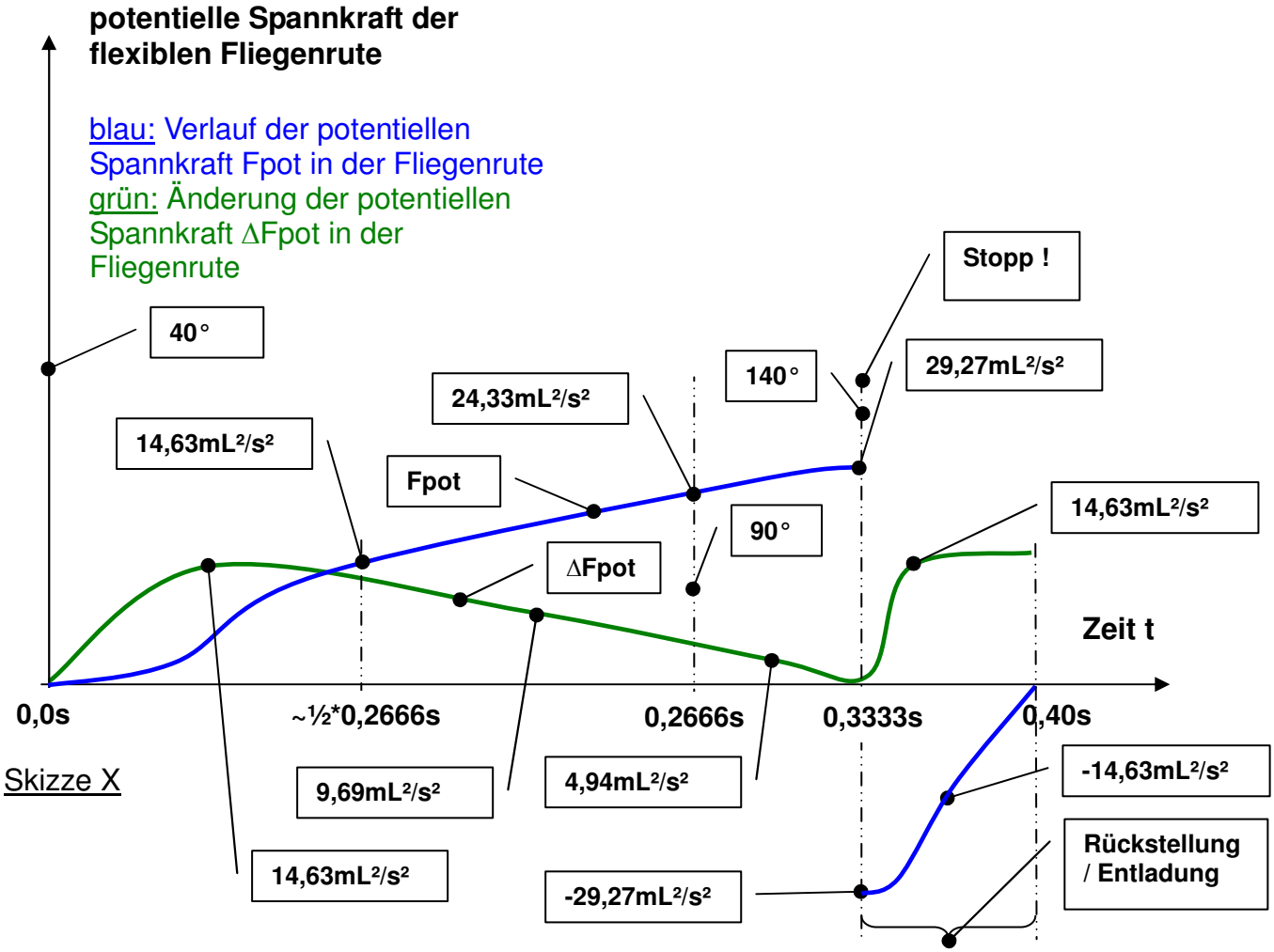
Fpot(rück,end) = 0,00L/-0,77L * 29,27 = **0,00** $\frac{m*L}{s^2}$

ΔFpot,end = -0,385L/-0,77L * 29,27 = **14,63** $\frac{m*L}{s^2}$ = ΔF(rück,end)

[17] Die Richtung der Rückstellung / Entladung geht mit einem negativen Vorzeichen ein. Wie bei einer Feder müssen auch hier die Wege, die für das Spannen (Laden) und Entspannen (Entladen) sorgen, unterschiedliche Vorzeichen besitzen.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Die nachfolgende Skizze X zeigt den Verlauf der auf die Spitze wirkenden potentiellen Spannkraft der flexiblen Fliegenrute[18].



Die bisherigen Ergebnisse deuten zusammen mit der Bildabfolge unter Abschnitt C2 eindeutig darauf hin, dass sich der ermittelte Verlauf der potentiellen Spannkraft kontinuierlich ändert. Die kontinuierliche Änderung der potentiellen Spannkraft führt zu einer optimalen Übertragung der Geschwindigkeit in die Rutenspitze. Schenkt der Werfer dem zu wenig Beachtung (und setzt z.B. Druckpunkte - „Handschock“), wird die Rutenspitze „unruhig“ und kann Wellen sowie Tailing Loops[19] in die Fliegenschnur eingeben, was über den Weg ihrer Streckung zu einem erheblichen Verlust der

[18] Gemäß den anfangs getroffenen Randbedingungen haben beide Fliegenruten keine Masse erhalten. Dass die Biegung der Fliegenrute trotz abnehmender Beschleunigung zunimmt, ist im Wesentlichen der tatsächlich vorhandenen Masse der Fliegenrute zuzuschreiben. Die näherungsweise getroffenen Zuordnungen der potentiellen Spannkraft sowie die gezogenen Schlüsse sind weiterhin gültig, weil durch die eigene Masse der Fliegenrute die auf die Spitze wirkenden Kräfte und damit auch die Beschleunigung sowie die aufzuwendende Kraft gleichmäßig vergrößert wird. Die experimentellen Daten zeigen eindeutig, dass die Biegung der Fliegenrute bis zum Stopp bzw. Beginn der Rückstellung / Entladung zunimmt ! Bei der Berechnung der potentiellen Spannkräfte und der Effizienz kann dieser Effekt in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

[19] Tailing Loops sind auch unter der Bezeichnung „Birne“ oder „Sauschwanz“ bekannt.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

übertragenen Energie führt. Die sich über die Wurfdauer kontinuierlich ändernde potentielle Spannkraft dient ihrem kontrollierten Auf- und Abbau, was der Rutenspitze einen „ruhigen“ Lauf ermöglicht[20].

D2) Auf die Spitzen beider Fliegenruten wirkende Kräfte

Bei der flexiblen Fliegenrute wirkt neben der potentiellen Spannkraft (Kraft der Lage) auch eine kinetische Kraft (Kraft aus Bewegung). Bei der absolut steifen Fliegenrute wirkt hingegen nur eine kinetische Kraft, weil sie sich nicht durchbiegt und deshalb keine potentielle Spannkraft zwischenspeichern kann.

Dass die absolut steife Fliegenrute keine potentielle Spannkraft aufnehmen kann, führt im Vergleich zur flexiblen Fliegenrute zu einer unterschiedlichen Verteilung der Kräfte.

***10. Feststellung:* Bei der flexiblen Fliegenrute führt die anfängliche Rotationsbewegung zu einer zunehmenden Biegung, wodurch die potentielle Spannkraft ansteigt, ohne dass die Masse der Fliegenschnur eine Beschleunigung erfährt. Bei der absolut steifen Fliegenrute führt jede anfängliche Bewegung unmittelbar zu einer Beschleunigung der Fliegenschnur, wofür schlagartig eine Kraft aufgewendet werden muss.**

Für die flexible Fliegenrute ergibt sich:

$F = m * a + \Delta Fpot$[21]

$Ff0 \approx 0 = F(>40°)$ (Siehe 10. Feststellung)

[20] Als Vergleich für den kontrollierten Auf- und Abbau der potentiellen Spannkräfte können die Arme eines Bogens herangezogen werden, weil die potentiellen Spannkräfte ähnlich verlaufen bzw. verlaufen sollen (es gibt natürlich auch Unterschiede, z.B. dass die Fliegenrute die potentielle Spannkraft sofort mit Beginn des Stopps abgibt - der Bogenschütze kann dies verzögern; oder dass die Spitze der Fliegenrute zu Beginn der Rückstellung / Entladung im Unterschied zu den gespannten Bogenarmen bereits eine relative Geschwindigkeit besitzt). Der Bogenschütze spannt die Bogenarme möglichst kontinuierlich, damit sie den Pfeil anschließend mit höchster Präzision beschleunigen - auch der Werfer soll die Fliegenrute möglichst kontinuierlich bis zum Stopp spannen, damit die Rutenspitze die Fliegenschnur präzise beschleunigen kann. Der Pfeil soll im Flug wenig schwingen, damit der dadurch verbundene Verlust an Energie gering ist - auch Wellen in der Fliegenschnur sollen deshalb vermieden werden. Das Fliegenwerfen kann und soll natürlich nicht mit dem Bogenschießen gleichgesetzt werden. Es gibt aber bezüglich der Wirkung der potentiellen Spannkräfte und deren kontrollierten Auf- und Abbau genügend Parallelen, welche den Einfluss der Biegung viel besser als andere Vergleiche verdeutlichen können.
Gerade dieser Vergleich hat Herrn Dr. Schmitt (siehe Danksagung) nach eigenem Bekunden die Wirkung der potentiellen Spannkräfte beim Fliegenwurf verständlich aufgezeigt.

[21] Der Werfer muss die Änderung der potentiellen Spannkraft $\Delta Fpot$ aufwenden. Nur die Änderung eines Zustandes erfordert eine Kraft, die Arbeit verrichtet.
Der Einfachheit halber wird $\Delta Fpot,1$ der Position zwischen 40° bis 90° und $\Delta Fpot,2$ der Position 90° zugeordnet. Diese Zuordnung liegt auf der sicheren Seite, weil dadurch die flexible Fliegenrute höhere Kräfte als bei der alternativen Zuordnung über den Mittelwert erhält.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Ff1 = m * 3,653 $\frac{L}{s^2}$ + 14,63 $\frac{m*L}{s^2}$ = **18,28** $\frac{m*L}{s^2}$ = Ff(40°-90°)

Ff2 = m * 54,76 $\frac{L}{s^2}$ + 9,69 $\frac{m*L}{s^2}$ = **64,45** $\frac{m*L}{s^2}$ = Ff(90°)

Ff3 = m * 41,98 $\frac{L}{s^2}$ + 4,94 $\frac{m*L}{s^2}$ = **46,92** $\frac{m*L}{s^2}$ = Ff(90°-140°)

Ff4 = m * 29,27 $\frac{L}{s^2}$ + 0,0 $\frac{m*L}{s^2}$ = **29,27** $\frac{m*L}{s^2}$ = Ff(140°)

Ff5 = **14,63** $\frac{m*L}{s^2}$ = Ff(rück,end)

Für die absolut steife Fliegenrute ergibt sich:

F = m * a; ΔFpot = 0;

Fs0 ≈ **24,45** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fs(>40°) (siehe 10. Feststellung)

Fs1 = **24,45** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fs(40°-90°)

Fs2 = **30,85** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fs(90°)

Fs3 = **30,79** $\frac{m*L}{s^2}$ = Fs(90°-140°);

D3) Kräfte (Momente) am Griff der Fliegenruten

Bei der Rotation der Fliegenrute wirkt im Rutengriff ein Moment M, welches vom Werfer aufgewendet werden muss. Das Moment errechnet sich aus dem Produkt von Kraft und Hebelarm.

Die Kräfte F sind unter Abschnitt D2 und der Hebelarm ist unter Abschnitt B4 berechnet worden. Danach ist der Hebelarm der flexiblen Fliegenrute über den gesamten Weg ihrer Spitze annähernd konstant. Für die absolut steife Fliegenrute ist der Hebelarm in den 40°,90° und 140° Positionen bekannt, auf halben Wege zwischen diesen Positionen entspricht der Hebelarm in etwa dem mittleren Wert[22].

[22] Durch die Berücksichtigung eines verkürzten Hebelarms wird bei der absolut steifen Fliegenrute die untere Grenze des Aufwandes berechnet („best case“), weil darüber hinaus auch nur der geminderte horizontale Kraftanteil herangezogen wird (siehe Abschnitt B4). Diese Betrachtung begünstigt den Aufwand der absolut steifen Fliegenrute, der bei der untersuchten Rotationsbewegung tatsächlich höher liegen dürfte. Mit dieser günstigeren Betrachtung soll auch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zumindest über einen kurzen Weg (kleiner Rotationswinkel) auf einer annähernd geraden Bahn geführt werden kann.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Für die flexible Fliegenrute ergibt sich:

Mf0(>40°) ≈ 0

Mf1(40°-90°) = 18,28 * 0,64 L = **11,70** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Mf2(90°) = 64,45 * 0,64 L = **41,25** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Mf3(90°-140°) = 46,92 * 0,64 L = **30,02** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Mf4(140°) = 29,27 * 0,64 L = **18,73** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Mf5 = 14,64 * 0,64 L = **9,36** $\frac{m * L^2}{s^2}$ = M(rück,end)

Für die absolut steife Fliegenrute ergibt sich:

Ms0(>40°) ≈ 24,45 * 0,64 L = **15,65** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Ms1(40°-90°) = 24,45 * ½ (0,64 + 1,0) L = **20,05** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Ms2(90°) = 30,85 * 1,0 L = **30,85** $\frac{m * L^2}{s^2}$

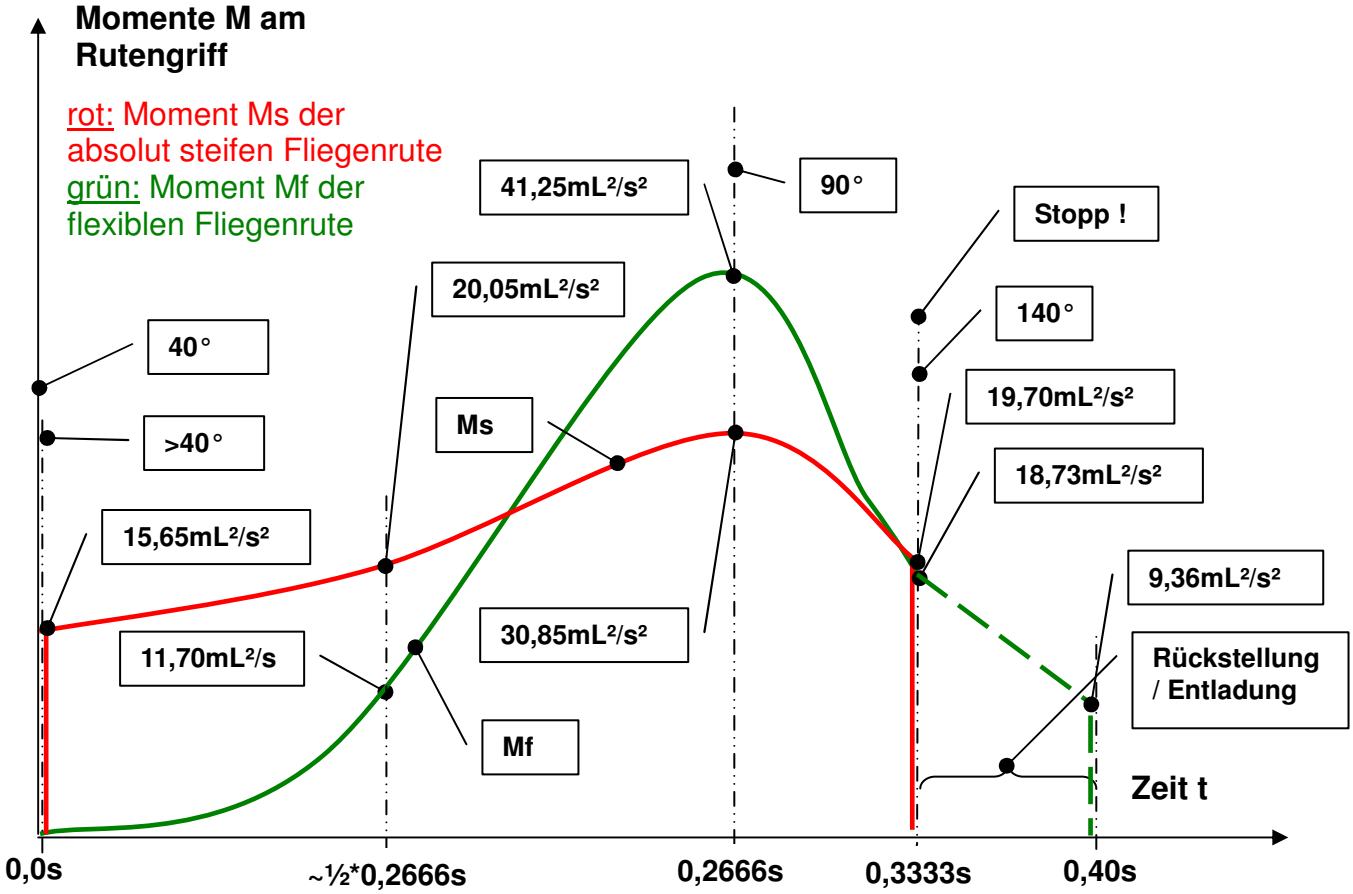
Ms3(90°-140°) = 30,79 * ½ (1,0 + 0,64) L = **25,25** $\frac{m * L^2}{s^2}$

Ms4(140°) ≈ 30,79 * 0,64 L = **19,70** $\frac{m * L^2}{s^2}$

***11. Feststellung:* Das vom Werfer aufzuwendende Moment steigt im Quadrat zur Länge L der Fliegenrute an[23].**

[23] Meine erste 10 Fuß Fliegenrute (3,0 m) der Schnurklasse 8 habe ich nach kurzem Gebrauch wieder verkauft. Sie war so steif, dass mein Handgelenkt die Rotationsbewegung nicht ohne erheblichen Kraftaufwand übertragen konnte und nach kurzer Dauer zu schmerzen begann, obwohl diese Fliegenrute „nur“ rd. 10 % länger als die üblichen 9 Fuß (2,70 m) Fliegenruten war. Dass der Kraftaufwand (Moment) im Quadrat zur Länge der Fliegenrute ansteigt, erklärt den erheblichen Anstieg des zusätzlichen Kraftaufwands, der deutlich über der 10%igen Längenzunahme der Fliegenrute liegt. Seither habe ich meine wenigen Fliegenruten, die 10 Fuß messen, mit viel Bedacht ausgewählt und auf eine „schnelle Bauchaktion“ geachtet. Bei dieser Aktion biegt sich die Fliegenrute im unteren Abschnitt vergleichbar mehr durch, wodurch sich sowohl der Hebelarm verkürzt als auch sich die Biegung und der Weg der Rückstellung / Entladung vergrößert. Dadurch wird der Kraftaufwand reduziert und eine solche Fliegenrute besitzt am Ende trotzdem noch genügend Rückstellvermögen, um die Fliegenschnur weit werfen zu können. Auch dieses Beispiel zeigt, dass die Biegung der Fliegenrute für den Kraftaufwand eine wichtige Rolle spielt !

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.



Skizze XI

E) Effizienz

Das Verhältnis zwischen der genutzten Energie und der aufgewendeten Energie entspricht der Effizienz bzw. dem Wirkungsgrad η.

E1) Energie der Rutenspitzen (Nutzen)

Die Energie E, welche die Spitzen der flexiblen und absolut steifen Fliegenrute am Ende des Wurfes erreichen, entspricht dem Nutzen[24]. Diese Energie lässt sich mit der Formel

$$E = \frac{1}{2} * m * v(end)^2$$

[24] Im Folgenden werden nur die Energien der Rutenspitzen betrachtet. Inwieweit sich diese Energien auch auf die Fliegenschnur übertragen lassen, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Damit mögen sich künftige Arbeiten befassen. Sicherlich spielen hierbei die werferischen Fähigkeiten eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich stellt aber eine hohe horizontale Endgeschwindigkeit der Rutenspitze das größte Potential für eine hohe Geschwindigkeit der Fliegenschnur zur Verfügung.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

berechnen. Die Endgeschwindigkeiten vf(end) bzw. vs(end) der Spitzen beider Fliegenruten wurden bereits unter Abschnitt C3 ermittelt.

Für die flexible Fliegenrute ergibt sich:

$$Ef = ½ * m * 12{,}535^2 \frac{L^2}{s^2} = \mathbf{78{,}56} \ \frac{m * L^2}{s^2}$$

Für die absolut steife Fliegenrute ergibt sich:

$$Es = ½ * m * 9{,}427^2 \frac{L^2}{s^2} = \mathbf{44{,}43} \ \frac{m * L^2}{s^2}$$

E2) Arbeit bzw. Energie der Rotation (Aufwand)

Die Arbeit bzw. Energie, welche der Werfer in die Rotation der Fliegenruten eingibt, entspricht dem Aufwand. Sie lässt sich mit der Formel

$$A = \sum M \ * \alpha(rad)$$

berechnen. Der Winkel α(deg) beträgt bei beiden Fliegenruten 100°, was einem Bogenmaß (rad) von

$$\alpha(rad) = \pi * \frac{\alpha(deg)}{180°} = \pi * 0{,}555 = \mathbf{1{,}75}$$

entspricht.

Befindet sich der Rutengriff in der Endstellung (140° Position), dann hat der Werfer die gesamte Arbeit bzw. Energie am Wurf geleistet. Über den Weg der Rückstellung / Entladung ändert sich der Rotationswinkel nicht weiter, so dass der Werfer keine Arbeit bzw. Energie mehr aufbringt.

***12. Feststellung:* Über den Weg der Rückstellung / Entladung der flexiblen Fliegenrute bringt der Werfer keine Arbeit bzw. Energie mehr ein, weil sich der Rotationswinkel nicht ändert (α=0). Über den Weg der Rückstellung / Entladung arbeitet allein die flexible Fliegenrute und sie erhöht dabei gleichzeitig die Geschwindigkeit ihrer Spitze.**

Die Summe der über den Weg der Rutenspitze wirkenden Momente im Rutengriff wird im Folgenden mit der Trapezformel[25] gut angenähert berechnet.

[25] Genauer die Sehnentrapezformel. http://de.wikipedia.org/wiki/Trapezregel

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Summe Mf(t) der Momente der flexiblen Fliegenrute:

$\sum Mf(t)$ = ½ (M0 + M1) * ½ * 0,2666s (~40°-65°)

+ ½ (M1 + M2) * ½ * 0,2666s (~65°-90°)

+ ½ (M2 + M3) * ½ (0,3333s-0,2666s) (~90°-115°)

+ ½ (M3 + M4) * ½ (0,3333s-0,2666s) (~115°-140°)

+ ½ (M4 + M5) * (0,4s-0,3333s) Rückstellung / Entladung

= ½ * 11,70 * 0,1333s + ½ * 52,95 * 0,1333s + ½ * 71,27 * 0,0333s

+ ½ * 48,75 * 0,0333s + ½ * 28,09 * 0,0666s

Dieser Betrag wird bei der Multiplikation mit α=0 zu 0, siehe 12. Feststellung

= 0,779 + 3,529 + 1,186 + 0,81 + 0,00 = **6,30** $\frac{m * L^2}{s^2}$ *s

Af(t) = $\sum Mf(t)$ * α(rad) = 6,30 * 1,75 = **11,025** $\frac{m * L^2}{s^2}$ *s

Summe Ms(t) der Momente der absolut steifen Fliegenrute:

$\sum Ms(t)$ = ½ (M0 + M1) * ½ * 0,2666s (~40°-65°)

+ ½ (M1 + M2) * ½ * 0,2666s (~65°-90°)

+ ½ (M2 + M3) * ½ * (0,3333s-0,2666s) (~90°-115°)

+ ½ (M3 + M4) * ½ * (0,3333s-0,2666s) (~115°-140°)

= ½ * 35,7 * 0,1333s + ½ * 50,90 * 0,1333s

+ ½ * 56,10 * 0,0333s + ½ * 44,95 * 0,0333s

= 2,672 + 3,392 + 0,934 + 0,748 = **7,74** $\frac{m * L^2}{s^2}$ *s

As(t) = $\sum Ms(t)$ * α(rad) = 7,74 * 1,75 = **13,545** $\frac{m * L^2}{s^2}$ *s

Über die gesamte Dauer des Wurfes wird am Griff der flexiblen und der absolut steifen Fliegenrute eine Arbeit bzw. Energie von

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Af = Af(t) / t = 11,025 $\frac{m*L^2}{s^2}$ *s / 0,3333s = **33,07** $\frac{m*L^2}{s^2}$

As = As(t) / t = 13,545 $\frac{m*L^2}{s^2}$ *s / 0,3333s = **40,67** $\frac{m*L^2}{s^2}$

verrichtet.

E3) Effizienz der flexiblen und absolut steifen Fliegenrute

Der direkten Vergleich der Effizienz beider Fliegenruten, die unter den selben Randbedingungen geworfen werden, ergibt folgendes:

η = E(Rutenspitze) / A(Rotation)

ηf(flexible Fliegenrute) = Ef / Af = $\frac{78{,}56}{33{,}07}$ = **2,37**

ηs(absolut steife Fliegenrute) = Es / As = $\frac{44{,}43}{40{,}67}$ = **1,09**

Gemäß den anfangs getroffenen Randbedingungen haben beide Fliegenruten keine Masse erhalten. Diese Randbedingung ist der Grund dafür, dass die berechneten Effizienzen über 1,0 liegen[26]. Da sich die Vernachlässigung der Masse auf beide Fliegenruten näherungsweise gleich auswirkt, ist der Vergleich der Effizienzen ηf/ηs jedoch aussagekräftig.

ηf / ηs = 2,37 / 1,09 = 2,17

***13. Feststellung:* Die Effizienz der flexiblen Fliegenrute ist gut doppelt so hoch (Faktor 2,17) wie die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute.**

Die vom Werfer zu leistende Arbeit bzw. Energie hängt also auch von der Masse der Fliegenrute ab.

***14. Feststellung:* Je weniger Masse / Gewicht die Fliegenrute besitzt, desto mehr steigt ihre Effizienz (bei ansonsten gleichbleibenden Eigenschaften der Fliegenrute).**

[26] Die Effizienz η kann nicht größer als 1,0 werden, weil die gewonnene Energie nie größer als die aufgewendete sein kann. Bei Berücksichtigung der Masse beider Fliegenruten würden die Momente im Rutengriff erheblich größer als die berechneten werden, so dass die Effizienzen bei beiden Fliegenruten unter 1,0 zu liegen kommen würden. Hierzu folgende Abschätzung: bei einem Gewicht beider Fliegenruten von rd. 80 Gramm (was in etwa der verwendeten Fliegenrute SAGE 586 RPL+ entspricht) und einem Gewicht der gestreckten Fliegenschnur von rd. 10 Gramm (was in etwa der geworfenen Fliegenschnur WF5F entspricht) ergibt sich ein Faktor von 80g/10g = 8. Wird dieses Masseverhältnis näherungsweise der Kraft zugerechnet, die auf die Spitzen wirkt, erhöht sich auch das Moment sowie die aufgewendete Arbeit bzw. Energie um diesen Faktor. Damit wären dann auch die Effizienzen beider Fliegenruten kleiner als 1,0.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

E4) Änderung der Effizienz bei sich ändernder Biegung

Hier will ich kurz abschätzen, wie sich die Effizienz bei einer höheren und geringeren Biegung der flexiblen Fliegenrute ändert. Diese Betrachtung ist nur überschläglich und will bzw. kann eine genauere Ermittlung nicht ersetzen !

Aus meinen vorangehenden Untersuchungen kann eine gute Abschätzung für den Fall abgegeben werden, dass die Biegung der flexiblen Fliegenrute kleiner als in meiner Wurfsequenz ist. In diesem Fall bewegen sich die für meine Wurfsequenz berechneten Werte in Richtung der für die absolut steifen Fliegenrute berechneten Werte, d.h. die Effizienz nimmt ab !

Der Fall einer größeren als in meiner Wurfsequenz festgestellten Biegung der Fliegenrute ist schwerer abzuschätzen, weil es dafür keine berechneten Werte gibt und meine erzeugte Biegung – im Vergleich zu Wurfsequenzen anderer Fliegenwerfer – bereits relativ hoch ist[27]. Sicher ist aber, dass die Effizienz nicht „endlos“ über eine zunehmende Biegung gesteigert werden kann, da sie auch vom Rückstellvermögen[28] der jeweiligen Fliegenrute abhängt. Ist das Rückstellvermögen der Fliegenrute an seine Leistungsgrenze gekommen, würde eine Erhöhung des Aufwandes (Arbeit) vermutlich keinen nennbaren Nutzen (Endgeschwindigkeit) mehr bringen.

An dieser Stelle möchte ich noch einen Vergleich zum Stabhochsprung ziehen[29]: Vor 1900, als für diese Disziplin nahezu starre Stäbe aus Eschenholz verwendet wurden, lag die übersprungene Höhe bei gut 3 Metern. Mit den modernen, flexiblen Stäben können rd. doppelt so große Höhen übersprungen werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass das Flexverhalten des Stabes gut auf das zu beschleunigende Gewicht (Masse) des Springers und seiner Anlaufgeschwindigkeit abgestimmt ist. Auch dieses Beispiel zeigt, dass einerseits die flexiblen Stäbe den starren deutlich überlegen sind, es andererseits aber auch auf das Biegeverhalten (Flexverhalten ~Rückstellvermögen) des flexiblen Stabes ankommt.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse meiner Untersuchungen sehe ich einen wesentlichen Grund für die Effizienz der flexiblen Fliegenrute darin, dass die im Rutengriff geleistete Arbeit bzw. aufgewendete Kraft - im Vergleich zur absolut steifen Fliegenrute - als ein kurzzeitiger Impuls "peak" wirkt. Wesentlich für einen kurzzeitigen Impuls „peak“ ist eine hohe Beschleunigung der Rutenspitze, die wiederum zu einer hohen Biegung der Fliegenrute führt[30]. Solange eine Steigerung der Biegung auch zur Steigerung dieses kurzzeitigen Impulses "peak" **und** der Endgeschwindigkeit führt, wird vermutlich auch die

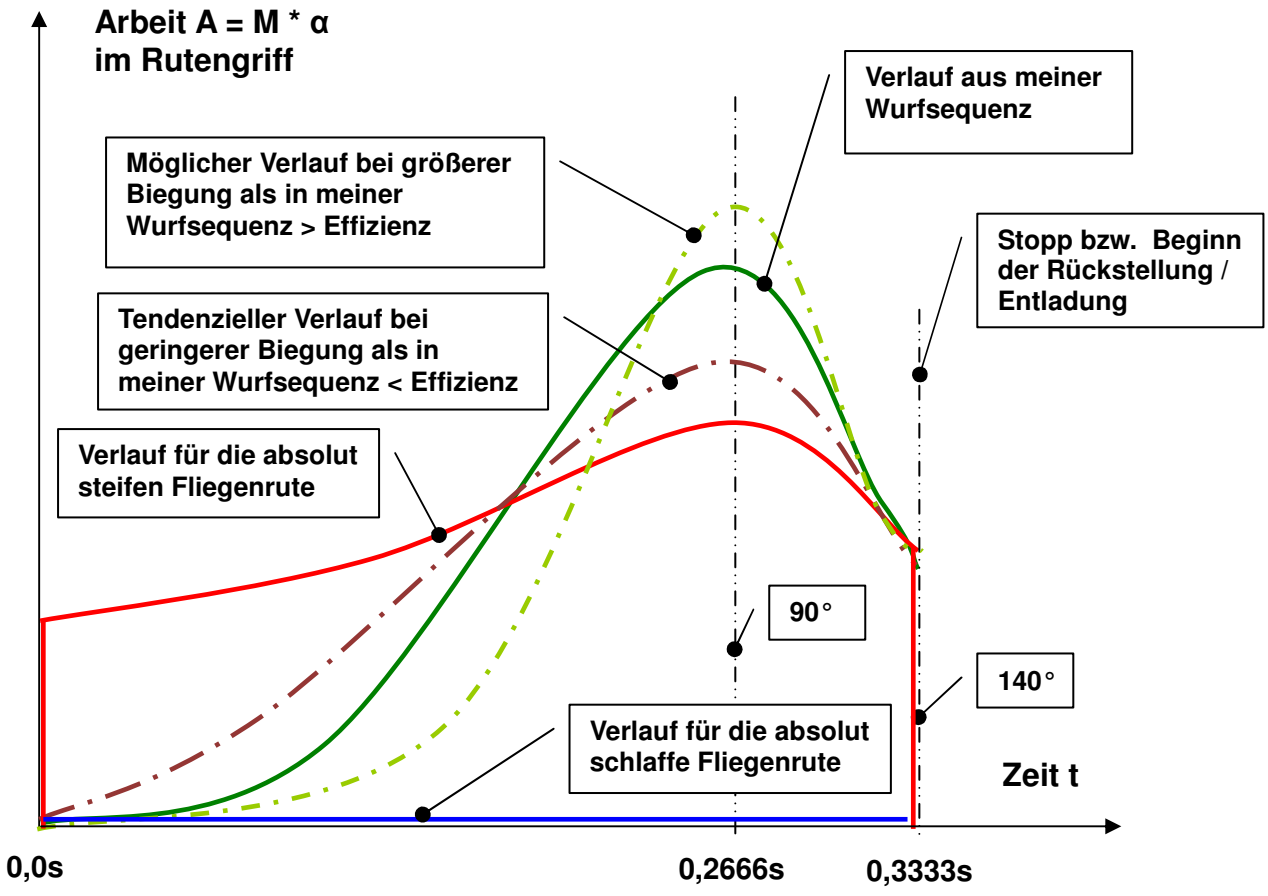
[27] z.B. im Vergleich zu der Untersuchung von Grunde Løvoll & Jason Borger von 2007 – ‚The Rod & The Cast’. Die Biegung meiner Fliegenrute ist deutlich höher als die dort untersuchte.
[28] Je schneller sich eine Fliegenrute gerade stellt, desto höher ist ihr Rückstellvermögen.
[29] Wie bei anderen Vergleichen gilt auch hier: Stabhochspringen kann und soll nicht mit dem Fliegenwerfen gleichgesetzt werden, da es natürlich Unterschiede gibt. Aber es gibt auch genügend Parallelen, welche die Wirkung der Effizienz beim Fliegenwurf gut verdeutlichen.
[30] Um einen kurzzeitigen Impuls erhalten zu können, muss die Beschleunigung der Rutenspitze kurzzeitig hoch sein. Wesentliche Voraussetzung dafür ist eine möglichst geringe Beschleunigung der Rutenspitze zu Beginn des Wurfes. Aus diesem Grunde ist es wichtig, den Wurf langsam zu beginnen und ihn zum Ende hin zu steigern. Eine mehr als linear zunehmende Beschleunigung der Rutenspitze ist dabei von Vorteil.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Effizienz ansteigen.

Diese Abschätzung zeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Biegung der Fliegenrute und ihrer Effizienz gibt.

Nachfolgende Skizze XII zeigt - grob abgeschätzt - die Änderung der Arbeit im Rutengriff bei sich ändernder Biegung:



Skizze XII

F) Weitere Untersuchungen

Der Fliegenwurf wird von weiteren Faktoren beeinflusst, auf die ich im Folgenden kurz eingehen möchte. Diese weiteren Untersuchungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

F1) Einfluss des Drehimpulses

Die in meinen bisherigen Untersuchungen festgestellte, kurzzeitig hohe Beschleunigung "peak" um die 90° Position herum deutet darauf hin, dass die Biegung der Fliegenrute noch einen zusätzlichen Effekt erzeugt, der auf der Drehimpulserhaltung beruht[31].

Aufgrund der zunehmenden Biegung der Fliegenrute verlässt der Drehpunkt der rotierenden Masse den Rutengriff und steigt in Richtung der Spitze empor. Dadurch erfährt die Spitze der Fliegenrute eine zusätzliche Beschleunigung, d.h. ihre Geschwindigkeit nimmt erheblich zu.

Der Drehimpuls beruht auf der Rotationsenergie[32] und wird über die nachstehende Formel berechnet:

$$D = m * r^2 * \omega; \text{ mit } \omega = \frac{v(Rutenspitze)}{r} \rightarrow D = m * r^2 * \frac{v}{r} = m * r * v$$

mit D = Drehimpuls; m = bewegte Masse; r = Radius zwischen dem Drehpunkt und der Rutenspitze; ω = Rotationsgeschwindigkeit um den Drehpunkt

Der Radius r muss senkrecht auf die horizontal verlaufende Geschwindigkeit zeigen (Index h).

$$D = m * r,h^2 * \frac{v,h}{r,h} = m * r,h * v,h$$

Die vorgenannte nach v,h umgestellte Formel lautet: $v,h = \frac{D}{m * r,h}$

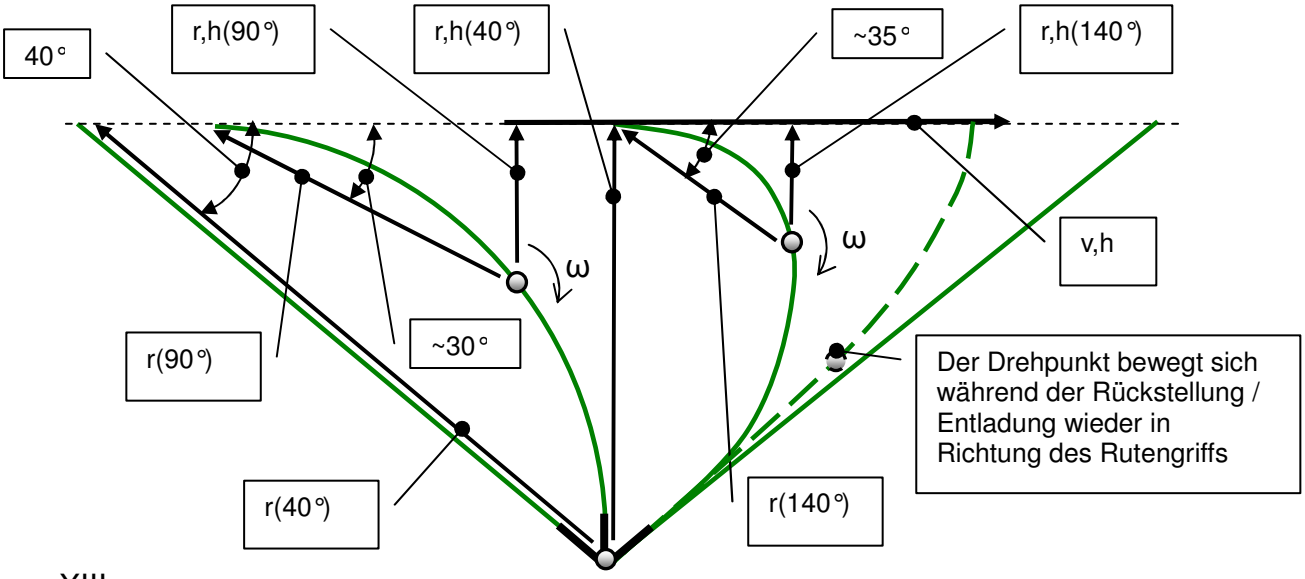
Als Drehpunkt gibt der Scheitelpunkt der Biegung der Fliegenrute eine ausreichend gute Annäherung ab, der in der folgenden Skizze XIII mit dem Symbol ● gekennzeichnet wird[33]. Der Drehimpuls D ist eine physikalische Erhaltungsgröße, d.h. die Energie bleibt dem System erhalten, auch wenn sich der Drehpunkt verschiebt. Für eine vereinfachte Betrachtung kann angenommen werden, dass der Drehimpuls generell über die gesamte Dauer des Wurfes konstant bleibt.

D(40°) = D(90°) = D(140°) = D(rück) = konstant

[31] Die Untersuchungen in diesem Abschnitt F1) habe ich in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Schmitt (siehe Danksagung) angestellt.
Die Drehimpulserhaltung führt zu dem im Eiskunstlauf und andere sportlichen Disziplinen bekannten Pirouetteneffekt.
[32] Energie der Bewegung, also kinetische Energie. http://de.wikipedia.org/wiki/Drehimpuls
[33] Eine genauere Bestimmung des Drehpunktes ist sehr aufwendig und nur mit höherer Mathematik möglich. Für die Darstellung der Wirkungsweise der Drehimpulserhaltung ist die geschilderte Annäherung ausreichend genau.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Für die flexible Fliegenrute ergibt sich:



Skizze XIII

Die geometrischen Beziehungen werden aus der vorstehenden Skizze XIII bestimmt[34]. Für den Radius r ergibt sich näherungsweise:

r(40°) ~ L; r(90°) ~ ½ L; r(140°) ~ ⅓ L

Der rechtwinklig zur Richtung der Geschwindigkeit stehende Radius r,h wird in der nachfolgenden Tabelle ermittelt:

Position Rotationswinkel / Stellung Rutengriff	**40°**	**90°**	**140°**
Radius r des Drehimpulses	**~ L**	**~ ½ L**	**~ ⅓ L**
Radius r,h des Drehimpulses rechtwinklig zur Richtung der Geschwindigkeit v,h	**r,h ≈ r(40°) * sin(40) = 0,643 L**	**r,h ≈ r(90°) * sin(30) = 0,250 L**	**r,h ≈ r(140°) * sin(35) = 0,191 L**

Die sich bewegende Masse m befindet sich im Wesentlichen oberhalb des Drehpunktes. Weil sich in meiner Wurfsequenz der Drehpunkt bei zunehmender Biegung vom Griff der Fliegenrute in Richtung ihrer Spitze bewegt, verkürzt sich der Radius und die sich bewegende Masse nimmt ab. Für die sich bewegende Masse m kann folgendes festgestellt werden:

m(40°) > m(90°) > m(140°)

[34] Eine genauere Bestimmung der geometrischen Beziehungen ist aufwendig und würde den Rahmen meiner Untersuchungen sprengen. Dieser Abschnitt soll die grundsätzliche Wirkungsweise der Drehimpulserhaltung aufzeigen, wofür die näherungsweise bestimmten geometrischen Größen ausreichend genau sind.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Dieser positive Effekt der abnehmenden sich bewegenden Masse m wird der Einfachheit halber vernachlässigt und die Masse als konstant angenommen. Der Drehimpuls wirkt auf die horizontale Geschwindigkeit v,h der Rutenspitze wie folgt:

v,h(>40°) = $\frac{D}{m*0{,}643L}$; v,h(90°) = $\frac{D}{m*0{,}25L}$;

v,h(140°) = $\frac{D}{m*0{,}191L}$; v(rück) = $\frac{D}{m*0{,}643L}$

v,h(90°)/v,h(>40°) = $\frac{0{,}643}{0{,}25}$ = **2,57**; v,h(140°)/v,h(90°) = $\frac{0{,}25}{0{,}191}$ = **1,31**

v(rück)/v,h(140°) = $\frac{0{,}191}{0{,}643}$ = **0,30**

***15. Feststellung:* Allein durch die Wirkung der Drehimpulserhaltung nimmt die horizontale Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute innerhalb der 40° bis 90° Position um den Faktor 2,57 und innerhalb der 90° bis 140° Position noch einmal um den Faktor 1,31 zu. Gerade während sich die Biegung aufbaut, wird die horizontale Geschwindigkeit deutlich gesteigert. Die Abnahme dieser Geschwindigkeit über den Weg der Rückstellung / Entladung auf den Faktor 0,30 wird durch die einsetzende Entspannung der Fliegenrute (Federwirkung) kompensiert[35].**

Für die absolut steife Fliegenrute ergibt sich dieser Effekt des Drehimpulses nicht, weil sie sich nicht durchbiegt. Bei ihr verbleibt der Drehpunkt im Rutengriff.

Bei einer sehr steifen Fliegenrute, die sich nur leicht durchbiegt, bewegt sich der Drehpunkt zwar etwas vom Rutengriff in Richtung der Rutenspitze, erreicht aber nicht die großen Abstände zum Rutengriff wie bei meiner Wurfsequenz. Dadurch fällt die Verkürzung des Radius r bzw. r,h geringer aus und damit auch die Zunahme der Geschwindigkeit aus der Drehimpulserhaltung.

Der Effekt der Drehimpulserhaltung bestätigt meine unter Abschnitt E4 getroffene Abschätzung, dass die Effizienz bei geringer werdender Biegung abnimmt. Darüber hinaus zeigt diese Betrachtung, dass die bis zum Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung/

[35] Wegen den zuvor beschriebenen, vereinfachten Annahmen erheben die Faktoren keinen Anspruch, die Zunahme der Geschwindigkeit der Rutenspitze exakt abzubilden. Durch das Zusammenspiel von zugeführter Rotationsenergie, Verlagerung des Drehpunktes und potentieller Federenergie bleibt die Spitze der flexiblen Fliegenrute in der Geschwindigkeit zunächst deutlich hinter der absolut steifen Fliegenrute zurück, holt aber trotz zunehmender potentieller Federenergie wegen der Verlagerung des Drehpunktes auf und erreicht schon in der 90° Position die Geschwindigkeit der absolut steifen Fliegenrute. Über diese Position hinaus überholt die Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen die der absolut steifen Fliegenrute und erreicht schließlich am Ende einen um 33% höheren Wert (siehe 7. Feststellung). Bei der flexiblen Fliegenrute wird die meiste Energie zum Ende des Wurfes hin übertragen.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Entladung zunehmende Biegung nicht nur die potentielle Federenergie der Fliegenrute, sondern auch den Effekt der Drehimpulserhaltung erhöht[36].

F2) Einfluss der Translationsbewegung

Der Abstand der Position des Rutengriffs zwischen den Stopppositionen (Anfangs- und Endstellung) zeigt an, in welchem Maße der Werfer die Translationsbewegung einsetzt. Je größer dieser Abstand ist, desto mehr wird die Translationsbewegung in den Fliegenwurf mit einbezogen. Sie verlängert den Weg, den die Rutenspitze - verglichen mit ihrem Weg bei ausschließlicher Rotationsbewegung - fährt.

F2.1) Translationsbewegung der Wurfsequenz

Aus meiner Wurfsequenz geht hervor, dass ich einen verhältnismäßig langen Translationsweg benutze (siehe Bilder unter Abschnitt C2). Dieser beträgt rd. einen Meter[37]. Um diesen Meter verlängert sich der Weg der Rutenspitze. Über die Rotationsbewegung legt die Rutenspitze einen Weg von 1,54 * L zurück (siehe unter Abschnitt B3). Bei einer Länge von rd. 2,65m, welche die verwendete SAGE 586 RPL+ besitzt, ergibt sich ein Weg von

WRs(f) = 1,54 * 2,65m = **4,08 m**

Damit beträgt der Anteil der Translationsbewegung in meiner Wurfsequenz 1,0m / 4,08m ≈ ¼ des Gesamtweges der Rutenspitze. Es fällt auf, dass sich dieses Verhältnis bei längeren Fliegenruten verkleinert und bei kürzeren Fliegenruten entsprechend vergrößert.

***16. Feststellung:* Je kürzer eine Fliegenrute ist, desto mehr trägt die Translationsbewegung zum gesamten, horizontalen Weg der Rutenspitze bei. Und je länger eine Fliegenrute ist, desto weniger trägt die Translationsbewegung zum gesamten, horizontalen Weg der Rutenspitze bei[38].**

Aus meiner Wurfsequenz geht weiter hervor, dass ich die Translationsbewegung weit überwiegend zu Beginn des Wurfes ausführe. Dadurch wird ein ggf. vorhandener Anteil schlaffer Fliegenschnur zu Beginn des Wurfes entfernt, die Fliegenschnur liegt gestreckt an der Rutenspitze an („Kraftschluss“) und die Fliegenrute wird für die anschließende Rotationsbewegung „vorgespannt“ (siehe Bilder 1 bis 6 unter Abschnitt C2). Die Biegung der Fliegenrute wird gleich zu Beginn des Wurfes aktiviert und kann sanft aufgebaut

[36] Dass die Biegung bis zum Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung zunimmt, hat die 9. Feststellung hervorgehoben. Solange die Biegung der Fliegenrute wie in meiner Wurfsequenz festgestellt zunimmt, verkürzt sich auch der Radius. Die Verkürzung des Radius erhöht den Effekt der Drehimpulserhaltung. Die Betrachtung des Drehimpulses zeigt, dass eine zunehmende Biegung der Fliegenrute dem Werfer Vorteile bringen kann.

[37] Der Translationsweg ist abgeschätzt aus dem Abstand des Rutengriffs zwischen dem ersten und letzten Bild meiner Wurfsequenz. Als Bezug dient meine Körpergröße von 1,77m.

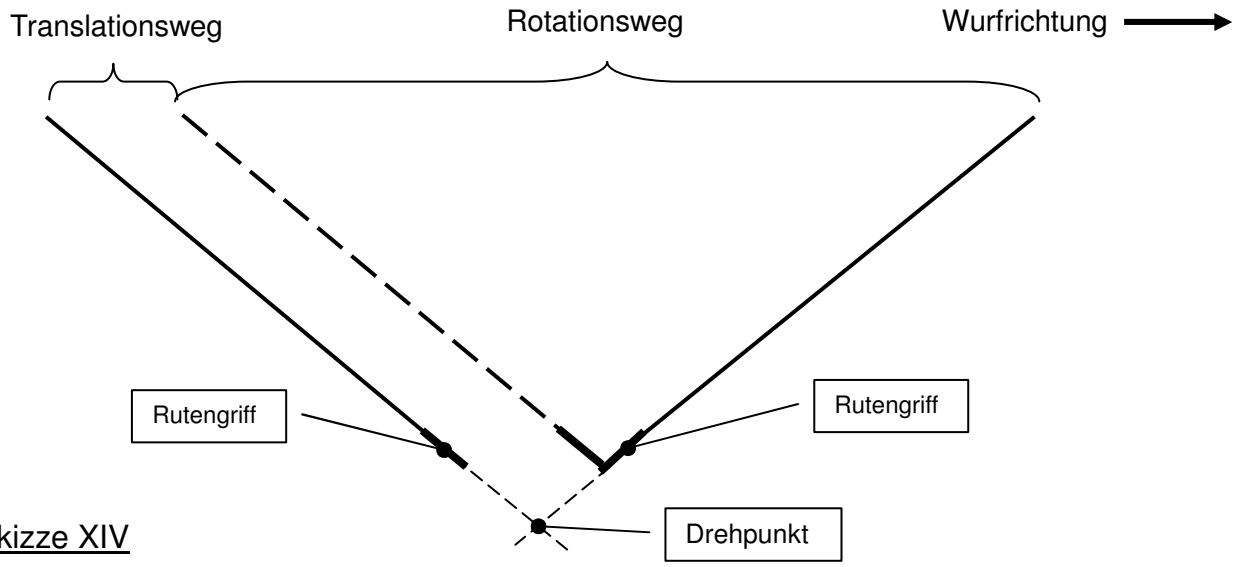
[38] Damit wird auch klar, dass bei kurzen Fliegenruten eine ausgeprägte Translationsbewegung von großem Vorteil ist. „Kurze Stecken“ (Fliegenruten um die zwei Meter) werden aus diesem Grunde am besten mit inaktivem Handgelenkt „aus der Schulter“ geworfen – siehe Hans Gebetsroither. Dadurch verlagert sich der Drehpunkt nach unten und der Anteil der Translationsbewegung wird größer – wodurch sich der Weg der Rutenspitze gerade bei diesen kurzen Fliegenruten insgesamt erheblich verlängern lässt.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

werden[39].

Dieser zusätzliche Weg aus der Translationsbewegung kann dem Werfer also Vorteile bringen. Der Werfer der absolut steifen Fliegenrute könnte mit der Translationsbewegung sogar einen geraden Anteil des Weges der Rutenspitze fahren. Die Translationsbewegung bewirkt auch, dass der Drehpunkt der Wurfbewegung tiefer kommt (s. nachstehende Skizze XIV). Je tiefer der Drehpunkt, desto größer kann der gerade Anteil des Weges der Rutenspitze bei gleichzeitig klein gehaltenem Rotationswinkel gesteigert werden. Dies ist für eine enge Schlaufe von großem Vorteil.

Da die Translationsbewegung bei beiden Fliegenruten in ähnlicher Art und Weise wirkt, kann unterstellt werden, dass sich ihr Einfluss im Vergleich neutralisiert.



Skizze XIV

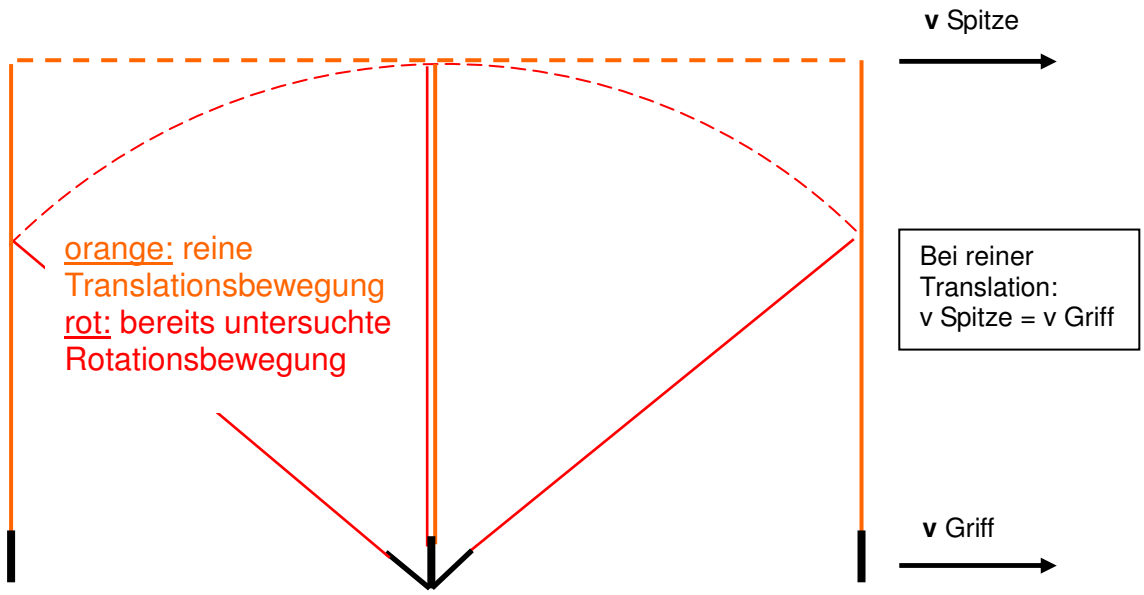
F2.2) Reine Translationsbewegung der absolut steifen Fliegenrute

Gemäß den anfangs getroffenen Randbedingungen habe ich der absolut steifen Fliegenrute eine Rotationsbewegung verordnet. Dadurch ergibt sich für sie aus der Zerlegung der Kräfte ein wesentlicher Nachteil, den ich unter Abschnitt B4 dargestellt habe[40]. Im Folgenden möchte ich kurz abschätzen, ob die absolut steife Fliegenrute effizienter geworfen werden könnte, wenn dieser Nachteil entfallen würde.

Der beschriebene Nachteil entfiele, wenn die absolut steife Fliegenrute mit einer reinen Translationsbewegung geworfen werden könnte. Die reine Translationsbewegung im Vergleich zu der untersuchten Rotationsbewegung ist in Skizze XV dargestellt.

[39] Aus den genannten Gründen profitieren auch andere Spezialwürfe, wie z.B. Rollwurf ("halber Fliegenwurf") oder Switch Cast (auch D- Cast genannt) von einer ausgeprägten Translationsbewegung zu Beginn des Wurfes.
[40] Andererseits habe ich der absolut steifen Fliegenrute durch die Verkürzung des Hebelarms auch einen Vorteil zugestanden, wodurch der Aufwand des Werfers abnimmt (siehe Abschnitte D3 und E2).

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.



Skizze XV

In diesem Falle wären die Geschwindigkeiten der Spitze und des Griffs der absolut steifen Fliegenrute gleich groß. Die gleichen Geschwindigkeiten erzeugen über die Beziehung $E = ½ * m * v^2$ die gleiche Energie. Daher muss die vom Werfer in den Griff eingegebene Energie gleich der Energie sein, welche in die Rutenspitze übertragen wird.

ηs(translation) = E(Rutenspitze) / E(Rutengriff) = 1,0

Mit 1,09 besitzt die in Abschnitt E3 für die Rotationsbewegung berechnete Effizienz der absolut steifen Fliegenrute in etwa den selben Wert. Bei einer reinen Translationsbewegung würde die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute folglich nicht höher als bei der Rotationsbewegung werden, welche ich meinen Untersuchungen zugrunde gelegt und mit den Ergebnissen der flexiblen Fliegenrute verglichen habe.

Die absolut steife Fliegenrute kann weder mit einer reinen Rotationsbewegung, noch mit einer reinen Translationsbewegung effizienter als die flexible Fliegenrute in meiner Wurfsequenz geworfen werden.

***17. Feststellung:* Weder mit einer reinen Rotations- noch mit einer reinen Translationsbewegung kann die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute gesteigert werden. Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, dass sich dies bei einer Kombination beider Wurfbewegungen ändert. Wegen der meinen Untersuchungen zugrunde gelegten Rotationsbewegung erfährt die absolut steife Fliegenrute also keine Nachteile, welche die Feststellungen meiner Untersuchungen grundsätzlich in Frage stellen.**

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

G) Fazit und Schlussbetrachtungen

Die Ergebnisse beziehen sich auf die Analyse meiner Wurfsequenz. Es bleibt offen, ob die Analyse von anderen Würfen zu ähnlichen Ergebnissen kommt.

***Fazit:* Aus meinen Untersuchungen geht hervor, dass die Biegung der Fliegenrute über die gesamte Dauer des Wurfes Vorteile bringt, die im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel zwischen der Drehimpulserhaltung und der Federenergie kommen und dass die Translationsbewegung dabei helfen kann, diese Effekte besser zu nutzen. Wegen der fehlenden Biegung besitzt die absolut steife Fliegenrute solche Vorteile nicht.**
Die flexible Fliegenrute überträgt in meiner Wurfsequenz die in den Griff eingegebene Energie in die Spitze deutlich effizienter, als es die absolut steife Fliegenrute kann.

G1) Unschärfen

Die meisten meiner anfangs getroffenen Randbedingungen dürften bei beiden Fliegenruten in etwa die selben Unschärfen verursachen. Die von den Randbedingungen beeinflussten Feststellungen sind aus einem Vergleich / Quotienten heraus entstanden, so dass sich die Unschärfen wahrscheinlich gegenseitig neutralisieren. Deshalb brauchen die Feststellungen an sich nicht in Frage gestellt zu werden.

Schwieriger sind die Unschärfen einzuschätzen, die sich dadurch ergeben, dass nur drei Positionen / Stellungen der Fliegenrute untersucht und die Werte dazwischen interpoliert wurden. Dies kann sich insbesondere bei der flexiblen Fliegenrute ungünstig auswirken, weil ihr Verhalten überwiegend nicht mit einem linearen Verlauf abgebildet werden kann. Unbestritten wären meine Untersuchungen genauer gewesen, wenn weitere Positionen / Stellungen ermitteln worden wären. Allerdings hätte dies meine technischen Möglichkeiten und den Rahmen meiner Untersuchungen gesprengt. An dieser Stelle muss ich ein Stück weit annehmen, dass die untersuchten Positionen / Stellungen der Fliegenruten charakteristisch genug sind, um die Realität genau genug abbilden zu können. Dafür spricht, dass die Ergebnisse meiner Untersuchungen insgesamt schlüssig sind.

Selbst wenn sich die berechneten Werte bei genauerer Betrachtung noch etwas zu Ungunsten der flexiblen Fliegenrute verschieben sollten, bleiben ihre gegenüber der absolut steifen Fliegenrute aufgezeigten Vorteile an sich bestehen.

G2) Zusammenfassung

Aus meinen Untersuchungen ergeben sich im Wesentlichen die folgenden Vorteile, die eine flexible Fliegenrute gegenüber einer absolut steifen Fliegenrute besitzt:

- Die horizontale Endgeschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute ist deutlich höher als bei der Spitze der absolut steifen Fliegenrute.
- Der Werfer kann die aufzubringende Kraft bzw. Arbeit bei der flexiblen Fliegenrute

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

zu Beginn des Wurfes langsam aufbauen und zum Ende des Wurfes wieder abbauen. Die absolut steife Fliegenrute erfordert hingegen zu Beginn des Wurfes einen schlagartigen Einsatz von Kraft bzw. Arbeit, der am Ende des Wurfes wiederum schlagartig abfällt.

- Die Biegung der flexiblen Fliegenrute erzeugt mit dem Drehimpuls und der Federwirkung zwei auf den Wurf günstig wirkende Effekte, welche die absolut steife Fliegenrute nicht besitzt.
- Bei der flexiblen Fliegenrute muss die maximale Kraft bzw. Arbeit nur über einen sehr kurzen Zeitraum („peak“) aufgewendet werden. Bei der absolut steifen Fliegenrute wirkt über den gesamten Zeitraum eine sich wenig ändernde Kraft bzw. Arbeit.
- ***Die Effizienz der flexiblen Fliegenrute ist gut doppelt so hoch wie die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute.***

Wird nur die flexible Fliegenrute für sich betrachtet, dann treten die vielen Vorteile, welche ihre Biegung dem Werfer ermöglichen, nicht so klar hervor. Erst der Vergleich zwischen einer flexiblen und absolut steifen Fliegenrute zeigt die Vorteile der flexiblen Fliegenrute auf. Unbestritten kann auch eine absolut steife Fliegenrute die Fliegenschnur werfen. Allerdings muss der Werfer dieser Fliegenrute bei gleicher Endgeschwindigkeit der Spitze erheblich mehr Kraft bzw. Arbeit aufwenden.

Gerade wegen ihres Biegeverhaltens kann die flexible Fliegenrute die Effizienz verglichen mit der einer absolut steifen Fliegenrute bedeutend erhöhen. Wichtig dafür ist, dass das Gewicht der Fliegenschnur und die gewünschte Geschwindigkeit gut auf die Spannkraft bzw. das Rückstellvermögen der Fliegenrute abgestimmt sind.

Je optimaler der Werfer die Biegung der Fliegenrute innerhalb ihres Leistungsvermögens abruft, desto effizienter überträgt die Fliegenrute die vom Werfer eingegebene Energie in ihre Spitze [41].

[41] Meine Untersuchungen belegen und vertiefen die Aussagen des Schulfilms „Perfektes Fliegenwerfen“, den H.R. Hebeisen mit mir zusammen 2009 gedreht hat. Im Übrigen hat Herr Dr. Schmitt (siehe Danksagung) noch angemerkt, dass sich durch den häufigen Gebrauch über die Evolution das beste Verfahren durchsetzt. Meine Untersuchungen zeigen die wesentlichen Gründe auf, weshalb wir Fliegenfischer mit flexiblen anstelle mit absolut steifen Fliegenruten werfen !

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Danksagung und Schlussworte

Mein Dank gilt

a) im Besonderen dem Physiker Dr. Franz-Josef Schmitt, der mich bei allen Fragestellungen zu den physikalischen Zusammenhängen beraten und unterstützt hat,
b) dem zertifizierten Flycasting Instruktor und Mathematiker Dr. sc. math. Jean-Paul Kauthen, der mir über den gesamten Bearbeitungszeitraum wertvolle Hinweise gegeben hat.

Ohne Eure aufwendige Beihilfe hätten meine Untersuchungen nicht mit diesen präzisen Formulierungen erscheinen können.

Schließlich danke ich meinen mittlerweile fast dreijährigen Zwillingstöchtern Greta & Theresa. Weil Ihr beide seit eurem vierten Lebensmonat durchschlaft, konnte ich abends die notwendige Zeit und Konzentration für meine Untersuchungen finden.
Ich drücke Euch !

Insgesamt habe ich in unregelmäßigen Abständen über ein Jahr an diesen Untersuchungen gearbeitet, bis ich sie Anfang Februar 2014 fertigstellen konnte. Über diesen Bearbeitungszeitraum erlebte ich einige „Aha“- Effekte, die mir die physikalischen Voraussetzungen für einen effizienten, kraftminimierten Fliegenwurf nähergebracht haben. Diese Erkenntnisse werden in meine Arbeit als zertifizierter Flycasting Instruktor mit einfließen !

Mir ist bewusst, dass Fliegenwerfen ein komplexes physikalisches Problem darstellt, wenn es genauer betrachtet wird. Ziel meiner Untersuchungen war es, einen kleinen Einblick in die physikalischen Größen und Effekte zu gewähren, die beim Wurf in der Fliegenrute wirken. Es würde mich sehr freuen, wenn meine Untersuchungen dazu beitragen können, die physikalischen Zusammenhänge beim Wurf mit der Fliegenrute besser zu verstehen.

Potsdam-Rehbrücke im Februar 2014

Tobias Hinzmann

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

Anhang

Übersicht der herausgearbeiteten Feststellungen:

1. Feststellung: ***Die Biegung der Fliegenrute hilft, dass die Spitze über ihren Weg annähernd eine Gerade fahren kann.***

2. Feststellung: ***Durch die Biegung verkürzt sich die Projektion der Fliegenrute auf die vertikale 90° Position um rd. 1/3 (0,36*L).***

3. Feststellung: ***Die Spitze der flexiblen Fliegenrute zeigt über einen großen Teil ihres Weges in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur; sie beschleunigt diese in horizontaler Richtung. Die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zeigt zu keinem Zeitpunkt in die Richtung der gestreckten Fliegenschnur; sie beschleunigt diese tangential auf einem Kreissegment.***

4. Feststellung: ***Bei einem Rotationswinkel α von 100° reduziert sich bei der absolut steifen Fliegenrute in der Endstellung der horizontale Anteil der Geschwindigkeit der Spitze um den Faktor 0,643. Je größer der Rotationswinkel α wird, desto kleiner wird dieser Faktor und damit auch der horizontale Anteil, den die absolut steife Fliegenrute aufbringen kann.***

5. Feststellung: ***Der Stopp bzw. die Rückstellung / Entladung der flexiblen Fliegenrute beginnt, wenn ihre Spitze in etwa die Hälfte (~50%) ihres Weges (aus Rotation) zurückgelegt hat. Die Rutenhand hat dann gerade die Endstellung 140° erreicht.***

6. Feststellung: ***Die Spitzen beider Fliegenruten brauchen unterschiedlich lange, um ihre horizontale Endgeschwindigkeit zu erreichen. Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dauert der Wurf der flexiblen Fliegenrute rd. 0,0666 Sekunden (um die Dauer der Rückstellung / Entladung) länger als der Wurf mit der absolut steifen Fliegenrute.***

7. Feststellung: ***Die Spitze der flexiblen Fliegenrute besitzt eine um ca. 33 % höhere horizontale Endgeschwindigkeit als die Spitze der absolut steifen Fliegenrute. Hingegen bewegt sich die Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute zu Beginn des Wurfes nur um 15% der Geschwindigkeit, welche die Spitze der absolut steifen Fliegenrute zu diesem Zeitpunkt bereits besitzt (Anfangsgeschwindigkeit).***

8. Feststellung: ***Die Spitze der flexiblen Fliegenrute besitzt zu Beginn des Stopps bzw. der Rückstellung / Entladung gut 80% ihrer Endgeschwindigkeit.***

9. Feststellung: ***Die Auslenkung ist ein Maß für die Biegung der Fliegenrute. Sie nimmt über die 90° Position hinaus zu. Jeder in die Rotationsbewegung eingegebene Weg (Änderung des Rotationswinkels) führt zu einer Steigerung der Biegung der Fliegenrute.***

10. Feststellung: ***Bei der flexiblen Fliegenrute führt die anfängliche Rotationsbewegung zu einer zunehmenden Biegung, wodurch die potentielle Spannkraft ansteigt, ohne dass die Masse der Fliegenschnur eine Beschleunigung erfährt. Bei der absolut steifen Fliegenrute führt jede anfängliche Bewegung unmittelbar zu einer Beschleunigung der Fliegenschnur, wofür schlagartig eine Kraft aufgewendet werden muss.***

11. Feststellung: ***Das vom Werfer aufzuwendende Moment steigt im Quadrat zur Länge L der Fliegenrute an.***

12. Feststellung: ***Über den Weg der Rückstellung / Entladung der flexiblen Fliegenrute bringt der Werfer keine Arbeit bzw. Energie mehr ein, weil sich der Rotationswinkel nicht ändert (α=0). Über den Weg der Rückstellung / Entladung arbeitet allein die flexible Fliegenrute und sie erhöht dabei gleichzeitig die Geschwindigkeit ihrer Spitze.***

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.

13. Feststellung: ***Die Effizienz der flexiblen Fliegenrute ist gut doppelt so hoch (Faktor 2,17) wie die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute.***

14. Feststellung: ***Je weniger Masse / Gewicht die Fliegenrute besitzt, desto mehr steigt ihre Effizienz (bei ansonsten gleichbleibenden Eigenschaften der Fliegenrute).***

15. Feststellung: ***Allein durch die Wirkung der Drehimpulserhaltung nimmt die horizontale Geschwindigkeit der Spitze der flexiblen Fliegenrute innerhalb der 40° bis 90° Position um den Faktor 2,57 und innerhalb der 90° bis 140° Position noch einmal um den Faktor 1,31 zu. Gerade während sich die Biegung aufbaut, wird die horizontale Geschwindigkeit deutlich gesteigert. Die Abnahme dieser Geschwindigkeit über den Weg der Rückstellung / Entladung auf den Faktor 0,30 wird durch die einsetzende Entspannung der Fliegenrute (Federwirkung) kompensiert.***

16. Feststellung: ***Je kürzer eine Fliegenrute ist, desto mehr trägt die Translationsbewegung zum gesamten, horizontalen Weg der Rutenspitze bei. Und je länger eine Fliegenrute ist, desto weniger trägt die Translationsbewegung zum gesamten, horizontalen Weg der Rutenspitze bei.***

17. Feststellung: ***Weder mit einer reinen Rotations- noch mit einer reinen Translationsbewegung kann die Effizienz der absolut steifen Fliegenrute gesteigert werden. Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, dass sich dies bei einer Kombination beider Wurfbewegungen ändert. Wegen der meinen Untersuchungen zugrunde gelegten Rotationsbewegung erfährt die absolut steife Fliegenrute also keine Nachteile, welche die Feststellungen meiner Untersuchungen grundsätzlich in Frage stellen.***

Fazit: ***Aus meinen Untersuchungen geht hervor, dass die Biegung der Fliegenrute über die gesamte Dauer des Wurfes Vorteile bringt, die im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel zwischen der Drehimpulserhaltung und der Federenergie kommen und dass die Translationsbewegung dabei helfen kann, diese Effekte besser zu nutzen. Wegen der fehlenden Biegung besitzt die absolut steife Fliegenrute solche Vorteile nicht.***
Die flexible Fliegenrute überträgt in meiner Wurfsequenz die in den Griff eingegebene Energie in die Spitze deutlich effizienter, als es die absolut steife Fliegenrute kann.

© Copyright Tobias Hinzmann. Alle Rechte vorbehalten.