

Der Flitschenstart

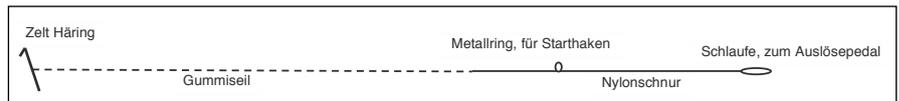
Starthilfe mit dem Gummiseil

Einziehfahrwerke sind etwas Beeindruckendes, vor allem dann, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt die ihnen zugewiesene Funktion ausführen. Aber wozu braucht ein kleiner Impeller-Jet überhaupt ein Fahrwerk, wo er doch immer herumgetragen wird? Ist er mal in der Luft, braucht er erst recht keines, und landen kann er wie die meisten Segelflugmodelle auch, nämlich auf dem Bauch. Wollen wir den oft spärlichen Schub wirklich dazu verwenden, ein Einziehfahrwerk im Himmel herumzuführen? Alles klar? Dann haben wir uns verstanden und sind beim Thema angekommen.

Geschichte

Wir befinden uns im Jahr 2008. Gerade ist mein neu gebauter Elektrojet von KEIRO fertig geworden und steht bereit für den Erstflug. Nach Herstellerangaben wird das Modell am besten ab Boden mit dem Gummiseil gestartet (wahrscheinlich wegen Krampfgefahr in den «Wadli» bei einem Handstart-Spurt). Fotos in der Anleitung zeigen auch schön den Startvorgang. Nur: Wie baut man eine Auslösevorrichtung und wie stark und wie lang soll das Gummiseil sein? So rief ich Kudi Eich, den Konstrukteur und Hersteller des Bausatzes, an und fragte ihn nach der Gummiseillänge: Stille am andern Ende der Leitung. «Bisch no da?» – «Jaja – eehm, da näme mer eifach es Schtück Hochstartgumi!» – «Jä zwee Meter oder zwänzg Meter?» – «Öppe zwüschedrinn!» Der fol-

genden präzisen Beschreibung über die Bauart der Startauslösevorrichtung konnte ich gut folgen, und das arithmetische Mittel seiner Längenangabe betrug 11 m, was mir für einen ersten Startversuch vernünftig schien. Dem Bau der Flitsche stand nichts mehr im Wege. Aber so einen Gummi kann man doch berechnen? Nach anfänglichem Zögern in Aussicht auf Integralrechnung und Computereinsatz brachte mich ein Gespräch mit einem Gewerbeschullehrer auf die Lösung: **Energiebetrachtung!** Schliesslich ist mir ja der exakte Beschleunigungsvorgang völlig egal. Die Kiste soll einfach fliegen, sobald das Gummiseil schlapp macht. Also im Wesentlichen eine Umwandlung von potenzieller Energie (gespannter Gummi) in kinetische Energie (gestartetes Flugmodell). Basta.



Skizze 1: Der Aufbau der Flitsche.

Schauen wir uns nun die Sache etwas genauer an. Mit einer Federwaage und einem Taschenrechner ausgerüstet ist es ein Leichtes, die folgenden Berechnungen und Experimente nachzuvollziehen und auf ein anderes Modell zu übertragen.

Die Auslösevorrichtung

Das Auslösen des gespannten Gummiseils geschieht durch Druck auf den Auslöseknopf auf dem Auslösepedal, wobei sich der Stift in die obere Platte senkt und die Schlaufe freigibt. Kudi Eich empfiehlt hier ausdrücklich eine Schnurschlaufe und keinen Ring. Ein solcher hätte sich einmal nach der Auslösung mehrmals ums Höhenleitwerk des gestarteten Modells gewickelt, zum Glück ohne böse Folgen.

Das Auslösepedal hat leichte Keilform und ist einfach selbst herzustellen. Die Abmessungen richten sich nach der Schuhgrösse der Person, welche den Start auslösen soll (siehe Skizze 2).

Das Gummiseil

Mein seit Beginn der Elektrofliegerei vernachlässigtes

Hochstartgummi¹ aus dem letzten Jahrhundert kommt zu neuen Ehren! Die ersten paar Meter auf der Rolle sind brüchig und unbrauchbar, doch in den unteren Schichten kommt guter Latex zum Vorschein.

Die Vermessung eines Testmeters mit der mechanischen Federwaage² ergibt folgendes Resultat (siehe Bild 3).

Das auf doppelte Länge ausgezogene Gummiseil erzeugt eine Zugkraft von ca. 27 N (2,7 kp). Die darin gespeicherte (potenzielle) Energie berechnet sich nach der Formel

$$W_G = \int_{s_0}^{s_1} F * ds$$

Energie im gespannten Gummiseil

Die rot schraffierte Fläche ist also ein Mass für die im Gummi gespeicherte Energie.

Im ersten Moment erstaunt das nichtlineare Verhalten (je stärker der Gummi gespannt wird, desto kleiner ist die Kraftzunahme), aber: Der Gummi

¹⁾ Gummiseil mit Schlauchquerschnitt, $d_s = 3/8''$; $d_f = 3/16''$; $A = 53,4 \text{ mm}^2$
²⁾ Federwaage PESOLA Medio-Line 40025, Kraftmessbereich 25 N



Bild 1: Der EIT beim Flitschenstart.

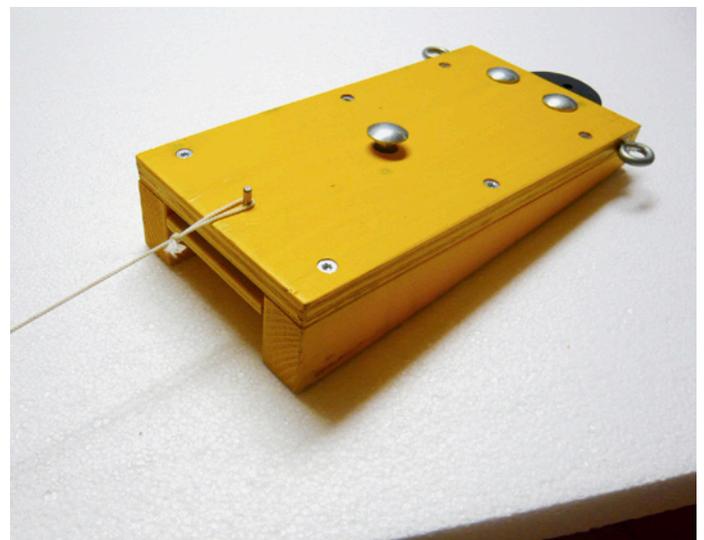
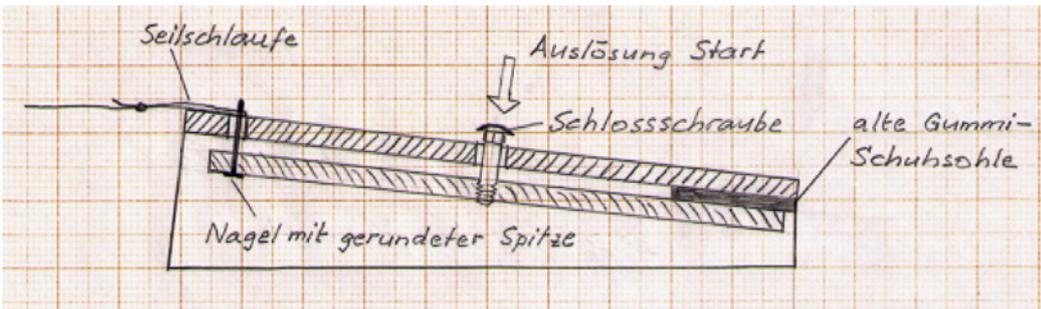


Bild 2: Auslösepedal mit eingehängter Schlaufe.



Skizze 2: Konstruktion Auslösepedal.

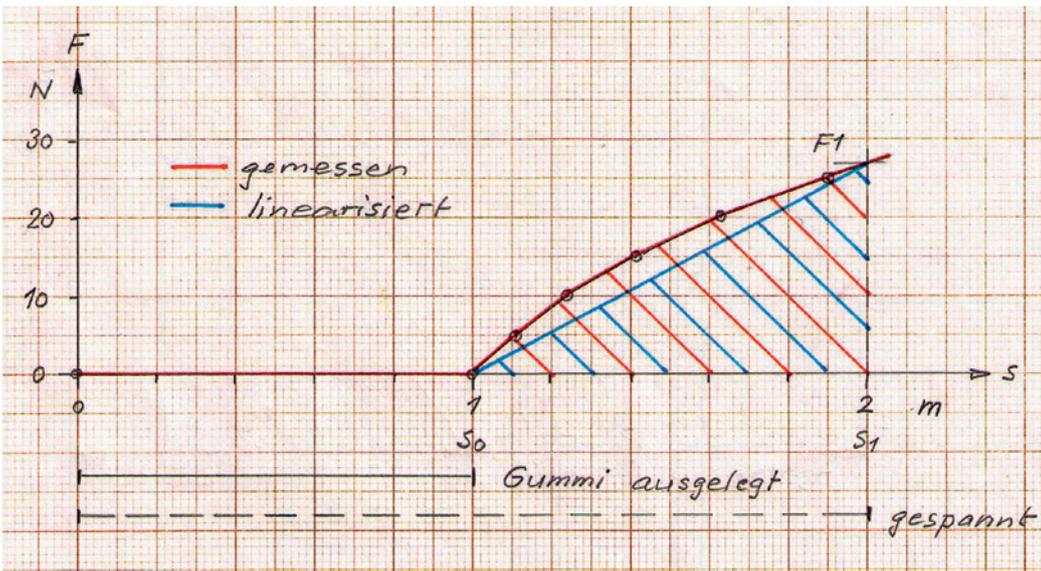


Bild 3: Kraft-Wegdiagramm des Gummiseils.

erfährt ja durch das Ausziehen eine Querschnittsverjüngung, und ein dünneres Gummi hat weniger Kraftzunahme – die Krümmung der Kurve ist also plausibel. Mit der vereinfachten Annäherung (blau schraffierte Fläche)

$$W_G = \frac{F_1 \cdot (s_1 - s_0)}{2}$$

Energie im gespannten Gummiseil, linearisiert

F_1 : Zugkraft des gespannten Gummis
 $s_1 - s_0$: Ausziehlänge

sind wir jedenfalls auf der sicheren Seite, um unser Modell in die Luft zu bringen.

Das Modell

Wir wollen unser Modell mit der Masse m [kg] in einen sicheren Flugzustand bringen. Dazu verpassen wir ihm die nötige Abhebegeschwindigkeit und bringen es auf Ausklinkhöhe.

Die kinetische Energie eines sich bewegenden Körpers beträgt allgemein gemäss Physikbuch

$$W_K = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

m = Masse [kg]
 v = Geschwindigkeit [m/s]

Als Geschwindigkeit ist die Minimalgeschwindigkeit des Modells (oder besser etwas mehr!) von Bedeutung. Diese ist leider meist nicht bekannt,

aber hier hilft uns eine Überschlagsformel aus der Aerodynamik³:

$$v_{min} = 1.3 \cdot \sqrt{\frac{G}{F} \cdot \frac{1}{c_{AA}}}$$

G/F = Flächenbelastung [N/m²]; (~g/dm²)
 c_{AA} = Auftriebsbeiwert beim Abheben (Langsamflug)

Bei einem Fluggewicht von $G = 12$ N ($m \sim 1,2$ kg) und einer Tragfläche von $F = 0,2$ m² ergibt sich eine Flächenbelastung von 60 N/m² (~60 g/dm²). Für den Auftriebsbeiwert nehmen wir $c_{AA} = 0,6$ an (da hebt fast jedes Waschbrett ab):

³ Helmut Quabek: «Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen» Formel 2.118 vereinfacht.

$$v_{min} = 1.3 \cdot \sqrt{60 \cdot \frac{1}{0.6}} = 13 \text{ m/s} \quad (\sim 47 \text{ km/h})$$

Die benötigte **kinetische Startenergie** für unser Mustermmodell beträgt somit

$$W_{MK} = \frac{1.2 \text{ kg} \cdot (13 \text{ m/s})^2}{2} = 101.4 \text{ Nm}$$

Die potenzielle Energie eines in die Höhe beförderten Körpers beträgt allgemein gemäss Physikbuch

$$W_P = m \cdot g \cdot h$$

m = Masse [kg]
 g = Erdbeschleunigung 9.81m/s²
 h = Höhe [m]

Beim Ausklinken soll das Modell eine Höhe von 2 m erreicht haben. Wir benötigen also eine zusätzliche potenzielle **Startenergie** von

$$W_{MP} = 1.2 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m} = 23.5 \text{ Nm}$$

Fazit: Um dieses Modell sicher zu starten, d.h. auf Minimalgeschwindigkeit und 2 m Höhe zu bringen, benötigen wir eine Energie von ca. 125 Nm. Interessant dabei ist, dass etwa 4/5 davon für die Geschwindigkeit und 1/5 für die Höhe benötigt wird.

Die Kräfte beim Start

Bis jetzt haben wir nur die Hauptkräfte betrachtet, nämlich die **Zugkraft des Gummiseils** und die entgegengesetzte Kraft, verursacht durch **Gewicht** und **Massenträgheit** des Modells. Aus den bisherigen Zahlenwerten ist bereits jetzt ersichtlich, dass knapp 10 m Gummiseil erforderlich sein werden.

Es sind aber noch andere Kräfte im Spiel, welche mehr oder weniger Einfluss auf den Start haben könnten, und die möchte ich hier kurz betrachten:

- Der **Eigenschub** des Impeller-Antriebs ist dann von Bedeutung, wenn mit Vollgas ge-

Fazit: Jeder Meter Gummiseil des vermessenen Typs liefert also bei einer Anfangs-Zugkraft von $F_1 = 27$ N eine Startenergie von gut $W_G = \frac{27 \text{ N} \cdot (2 \text{ m} - 1 \text{ m})}{2} = 13.5 \text{ Nm}$

startet wird. Die relativ hohe Strahlgeschwindigkeit lässt uns bis zum Ausklinken keine grosse Schubveränderung erwarten, sodass wir hier vereinfachend mit einem konstanten Schub, dem Standschub, rechnen können. Der Impeller-Jet hängt für diese Messung mit Federwaage und Schnur vertikal am Kinderschaukel-Gestell. (Diese Messweise ist natürlich nur zu empfehlen, wenn der Schub kleiner ist als das Modellgewicht!)

• Die **Bodenreibung** ist messbar, indem das Modell mittels Federwaage und Schnur langsam über den Boden geschleift wird; sie erreicht leicht 50% des Modellgewichts! Während dem Startvorgang nimmt die Bodenreibung mit zunehmendem Auftrieb ab. Der Einfachheit halber nehmen wir einmal an, dass sich die Reibungskraft auf dem Weg bis zum Ausklinken linear reduziert.

- Der **Luftwiderstand** des Modells nimmt im Quadrat zur Geschwindigkeit zu und beträgt bei der Abhebegeschwindigkeit erst 20% des Eigengewichts des Modells (bei einem Modell mit Gleitzahl 5:1). Wir vernachlässigen ihn.
- Den **Gegenwind** lassen wir ausser Acht; der ist auf unserer Seite!
- Das **Gefälle der Startpiste** (gibt es das ausser in Huttwil?) können wir berücksichtigen, indem wir die Ausklinkhöhe des Modells entsprechend ändern.
- Die statische Ausmessung des Gummiseils (siehe Bild 3) zeigte nur eine kaum messbare Hysterese (Weg-Kraft-Unterschied zwischen Spannen und Loslassen). Eventuelle **Eigenverluste im Gummiseil** lasse ich also unberücksichtigt.



Bild 5: Messung der Bodenreibung mittels Federwaage.

Die Berechnung des Gummiseils

Bild 6 zeigt die von mir berücksichtigten Kräfte beim Start. Es steht also nicht die ganze im Gummiseil gespeicherte Energie für den Start zur Verfügung – ein Teil geht durch Bodenreibung verloren. Beim Vollgasstart hilft uns hingegen der Schub des Impeller-Antriebs. Unter Berücksichtigung dieser beiden Vortriebskräfte steht uns folgende Startenergie W_S zur Verfügung; sie muss grösser oder gleich der Startenergie des Modells $W_{MK} + W_{MP}$ sein:

Daraus folgt als einfache Berechnungsformel für die Ausziehlänge des Gummiseils:

$$S_A \geq \frac{2 \cdot (W_{MK} + W_{MP})}{F_G - F_R + 2F_I}$$

Ausziehlänge (Startstrecke bis zum Ausklinken)

- W_{MK} = Kinetische Energie des Modells (Bewegungsenergie)
- W_{MP} = Potenzielle Energie des Modells (Ausklinkhöhe)
- F_G = Zugkraft am Gummiseil
- F_R = Bodenreibung
- F_I = Standschub Impeller

$$W_S = \frac{(F_G - F_R) \cdot S_A}{2} + F_I \cdot S_A = S_A \cdot \frac{F_G - F_R + 2F_I}{2} \geq W_{MK} + W_{MP}$$

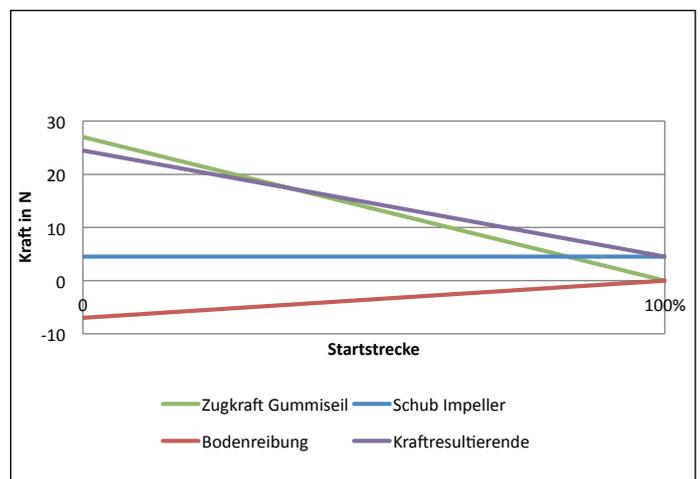


Bild 6: Kräfte beim Startvorgang.



Bild 4: Messung von Masse (1,2 kg) und Standschub (4,5 N).

Für mein Modell EIT und das auf **doppelte Länge** ausgezogene Gummiseil heisst das:

$$s_A > \frac{2 * (101.4 + 23.5) \text{ Nm}}{27 \text{ N} - 7 \text{ N} + 2 * 4.5 \text{ N}} = \mathbf{8.6 \text{ m}}$$

Seil- und Ausziehlänge mit Impellerschub

Zur Verhinderung angesaugter Teile vom Boden beim Gleitstart wird oft ohne Schub gestartet und erst nach dem Lösen vom Gummi Vollschub gegeben:

$$s_A > \frac{2 * (101.4 + 23.5) \text{ Nm}}{27 \text{ N} - 7 \text{ N}} = \mathbf{12.5 \text{ m}}$$

Seil- und Ausziehlänge ohne Schub

Die Belastung von Modell und Pilot

Bevor wir zur Praxiserprobung gehen, machen wir noch eine kleine Kontrolle: Was braucht unsere Pilotenpuppe für eine Ausrüstung? Überlebt sie den katapultähnlichen Start?

Bei Vollgas haben wir einen max. Startschub von 31,5 N bei 1,2 kg Modellgewicht. Die Startbeschleunigung beträgt somit

$$a = \frac{F}{m} = \frac{31.5 \text{ N}}{1.2 \text{ kg}} = 26.25 \text{ m/s}^2$$

(1 kg = 1 Ns²/m)

Dies entspricht etwa der 2,7-fachen Erdbeschleunigung. Somit genügt eine Pilotenpuppe mit Jet-Helm; Sauerstoffmaske



Bild 7: Mein Werkspilot im Elektro-Impeller-Trainer.

und Druckanzug sind eindeutig übertrieben!

Die Startversuche

An den ersten Startversuch kann ich mich noch gut erinnern: 12 Schritte Gummiseil auf 24 Schritte ausgezogen (warum sollte ich mich nicht auf meine Berechnungen verlassen?) – Vollgas – Auslöseknopf: Das Gummiseil zischt davon, natürlich ohne EIT! Was war passiert? Bei Vollgas hatte sich trotz relativ schwachem Antrieb der Starthaken aus dem Metallring geschoben.

Die folgenden Starts mit derselben Gummi- und Ausziehlänge haben dann immer zu «sauberen» Starts geführt – mit und ohne Gegenwind. Das neue Prozedere: Vollgas möglichst bald nach dem Druck auf

den Auslöseknopf. Das Problem ist nur, dass ich beim Abziehen des Modells vor Schreck oft beinahe vergesse, Schub zu geben!

Nun interessiert natürlich die kürzest mögliche Gummiseillänge! Dazu habe ich mehrere Gleitstarts (ohne Schub) durchgeführt. Die Endleistenquerer sind dabei leicht nach unten gewölbt; das Höhenruder leicht gezogen. Bei 10 m Gummi- resp. Ausziehlänge ist diese untere Grenze erreicht: Mit einem Hauch von Gegenwind wird eine Bodenüberhöhung von etwa 1 m erreicht; die Gegenrichtung liefert noch gerade einen Hüpfen.

Schlussbetrachtung

Kudi Eich hatte also recht mit der Gummilänge «zwischen

2 m und 20 m», und die Ungenauigkeit seiner Angabe hatte mich motiviert, der Sache etwas näher auf den Grund zu gehen. Die hier präsentierten Überlegungen sind keine exakte Abhandlung des Themas, aber sie zeigen, dass man mit etwas Physik-Kenntnis in unserem Hobby etwas anfangen kann!

Nun fragt mich ein junger Mann (nennen wir ihn mal Tom Wulf – Name frei erfunden), welchem ich über meine Berechnungen erzählt habe:

«Dini Usführige si ja guet und rächt, aber wenn ig jitz e Tiger F5E mit 1,8 kg Gwicht ha, wie n'es **dicks** Gummiseili mues'í de chouffe?»

Antwort: «Jaaah – eeehm – so zwüsche 2 und 20 mm!!!» ■

Ruedi Schmid, MGThun