



Rechenprogramm für einen Kurbelantrieb

Berechnung der Antriebskräfte eines Ornithopters

Das Programm ergänzt das Schlagflügelrechenprogramm **Orni 2** und ist nur in Verbindung mit ihm funktionsfähig. Zum Verständnis der nachfolgenden Rechenschritte sollte der Inhalt dieses Programms bekannt sein.

Die Berechnungen ermöglichen die Beschreibung der Antriebskräfte eines Ornithopters mit einem bestimmten Kurbelantrieb. Ziel ist es dabei, den Verlauf des Kurbeldrehmoments zu beschreiben, das zur Überwindung des Flügelschlagmomentes erforderlich ist. Außerdem wird versucht, die Antriebsbelastung durch den Einbau von Federn zu verringern.

Der Autor übernimmt keinerlei Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Berechnung und der gemachten Angaben.

- Das Programm ist mit der Software "Mathcad 13" geschrieben.
- Der Schutz des Arbeitsblattes kann mit Mathcad nach dem Speichern im xmcd-Format entfernt werden (ohne Passwort).
- Im Normalfall sind nur die nachfolgend gelb markierten Felder zur Eingabe erforderlich.

Das hier aufgeführte Rechenprogramm ist als Open-Source-Software zu verstehen. Damit ist es jedem möglich, Einblick in das Rechenverfahren zu nehmen. Jeder hat die Erlaubnis diesen Quellcode beliebig weiter zu geben, zu verändern und vor allem zu korrigieren und zu verbessern.

Inhalt

1. Eingangsparameter	2
2. Flügelschlagmoment	3
3. Kurbeldrehmoment	3
4. Drehmomentfeder.....	6
5. Kompensationsfeder.....	7
6. Endlagenfeder	9
7. Kurbeldrehmomente	10
8. Kurbelantriebsleistung	12



1. Eingangsparameter

Für den Zugriff auf die Daten vom Rechenprogramm **Orni 2** dient folgender Verweis

 Verweis: F:\orni\daten\orni\orni2.xmcdz

Die Datei von vorliegendem Programm und die Datei von **Orni 2** sind im gleichen Verzeichnis zu speichern. Andernfalls ist der Verweis anzupassen. Das Rechenprogramm funktioniert nur mit korrektem Dateiverweis.

Die Größe der Eingabewerte wird nicht kontrolliert. Sie stehen untereinander in Beziehung und sollten nach modellbautechnischen Gesetzmäßigkeiten plausibel sein.

Die Beispielwerte entsprechen etwa den Werten eines **EV-Ornithoptermodells** (Spannweite 3 Meter, Modellgewicht 5 kg).

Bei folgender Untersuchung wird ein einfacher Antrieb mit Motor, Getriebe und Kurbel zugrunde gelegt. Der Kurbelzapfen greift in eine Kreuzschleife, die über je einen Lenker mit dem inneren Hebelarm der beiden Schlagflügelhälften verbunden ist - etwa in der nachstehend abgebildeten Weise. Auch Antriebe mit einer Kardankurbel verhalten sich wie hier beschrieben.

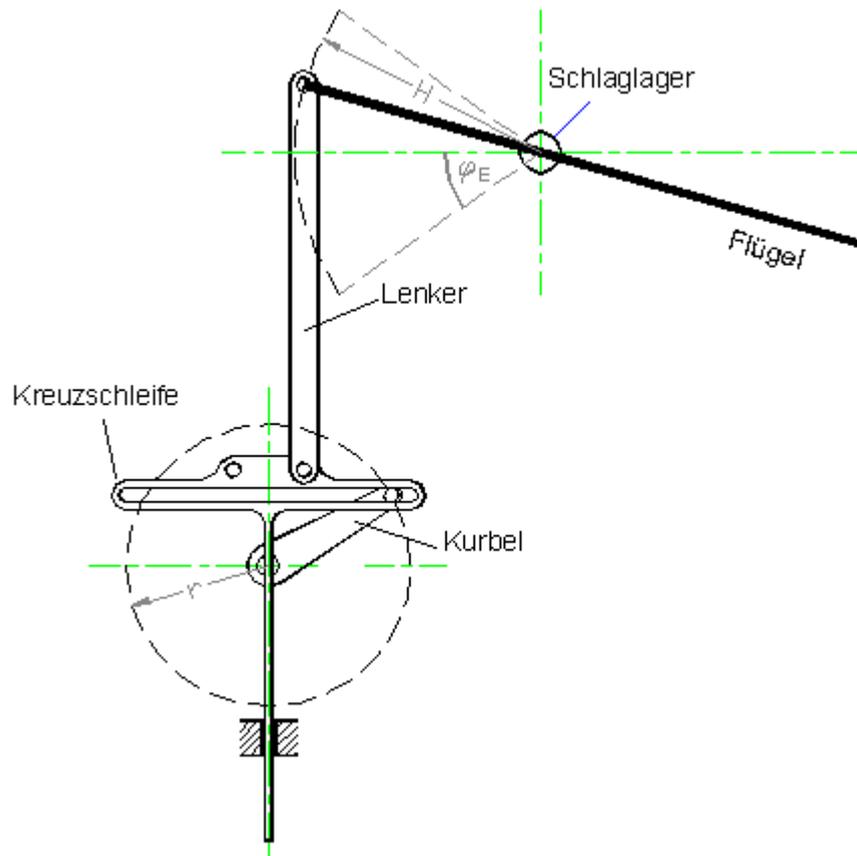


Abb. 1-1 Kurbelantrieb mit Kreuzschleife

Zur Berechnung der Antriebskräfte ist die Angabe der Länge H_2 des inneren Schlagflügelhebelarms und die Länge des Kurbelarms r erforderlich. Beide Werte stehen untereinander in Beziehung. Der damit angestrebte Schlagendlagenwinkel ϕ_E ist bereits im Rechenprogramm **Orni 2** festgelegt. Hier ist daher nur noch die Länge des Kurbelhebelarms r anzugeben.



Länge des Kurbelhebelarms

$$r = 24 \cdot \text{mm}$$

Der vorgegebene Schlagendlagenwinkel ϕ_E beträgt

$$\phi_E = 30 \cdot \text{Grad}$$

Länge des inneren Flügelhebelarms

$$H_2 = \frac{r}{\sin(\phi_E)}$$

$$H_2 = 48.0 \cdot \text{mm}$$

2. Flügelschlagmoment

Die Schlagmomente des Flügels wurden im **Orni 2** so definiert, dass ein in Richtung Heben wirkendes Moment des Flügels positiv ist. Folgende Schlagmomente wurden so bestimmt

Schlagmoment der aerodynamischen Kräfte

$$M_{\text{SchlA}_i}$$

Flügelbeschleunigungsmoment

$$M_{\text{SchlB}_i}$$

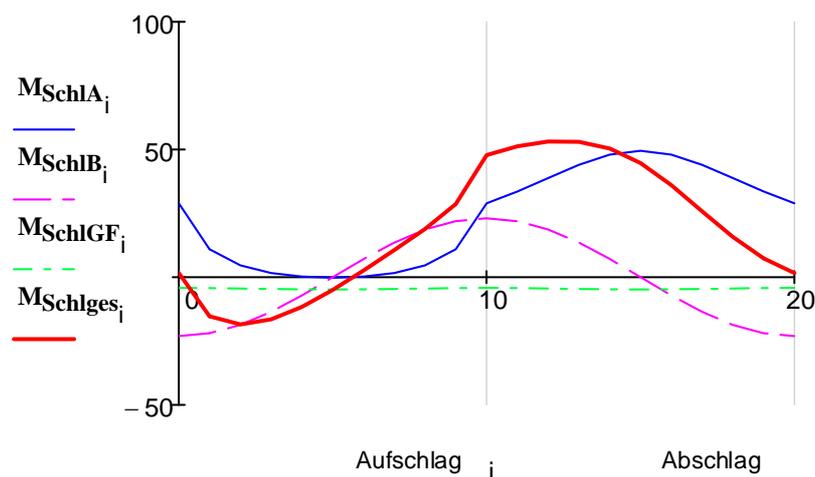
Moment zum Heben des Flügelgewichts

$$M_{\text{SchlGF}_i}$$

und das gesamttes Schlagmoment

$$M_{\text{Schlges}_i}$$

$$M_{\text{Schlges}_i} = M_{\text{SchlA}_i} + M_{\text{SchlB}_i} + M_{\text{SchlGF}_i}$$



Schlagmomente des Flügels

Diese Schlagmomente des Flügels wirken auf den Antrieb und dienen als Ausgangsbasis für die Berechnung der Antriebskräfte. Es soll nun das Drehmoment der Kurbel beschrieben werden, dass zur Überwindung des Flügelschlagmoments erforderlich ist.

3. Kurbeldrehmoment

Zunächst wird eine Vereinfachung vereinbart. Der Lenker wird als ständig senkrecht stehend angenommen. Das ist mechanisch zwar eigentlich nicht möglich, erspart aber die Festlegung weiterer Antriebsabmessungen und weitere Rechenschritte. Die Neigungsbewegung der Lenker ist sowieso relativ klein. Außerdem gleichen sich die seitlichen Kräfte beider Flügelseiten gegenseitig aus, so dass diese Festlegung ohne weiteres zulässig ist.

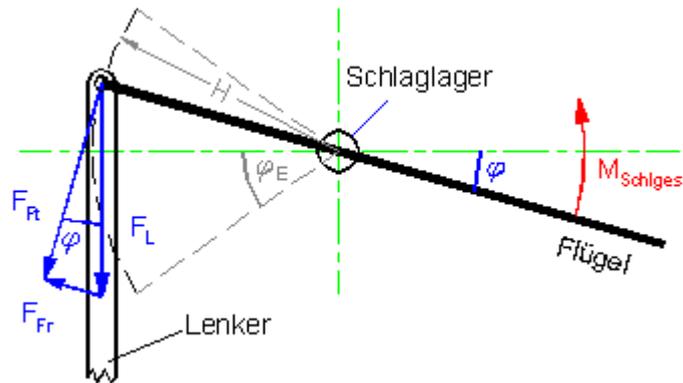


Abb. 3-1 Die aus dem Schlagmoment resultierende Kraft im Lenker

Man beginnt beim Kraftfluss mit dem Gesamtschlagmoment des Flügels $M_{Schleges}$. Es bewirkt am Ende des inneren Flügelhebelarms die tangential zur Schlagbewegung gerichtete Flügelfkraft F_{Ft} . Diese lässt sich aufteilen in eine Kraft F_L in Richtung des Lenkers und in eine Kraft F_{Fr} , die radial über den inneren Flügelhebelarm auf das Schlaglager wirkt. Die radiale Kraft ist bei dieser Betrachtung hier ohne Bedeutung.

$$F_{Ft_i} = \frac{M_{Schleges_i}}{H_2}$$

Die Kraft F_L des Lenkers ist abhängig vom jeweiligen Schlagwinkel ϕ (klein Phi, die Zeichnung enthält die sonst übliche Schreibweise dieses Buchstabens) des Flügels.

$$F_{L_i} = \frac{F_{Ft_i}}{\cos(\phi_i)}$$

so dass für die Lenkerkraft insgesamt gilt

$$F_{L_i} = \frac{M_{Schleges_i}}{H_2} \cdot \frac{1}{\cos(\phi_i)}$$

Das untere Ende des Lenkers ist mit der Kreuzschleife verbunden. Deren Kraft wirkt immer senkrecht auf den Kurbelzapfen und erzeugt dort die radialen und tangentialen Kurbelkräfte F_{Kur} und F_{Kut} . Die tangentiale Kurbelkraft folgt aus der Beziehung

$$F_{Kut} = F_L \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)$$

und ist abhängig vom Kurbeldrehwinkel γ zum Betrachtungszeitpunkt i.

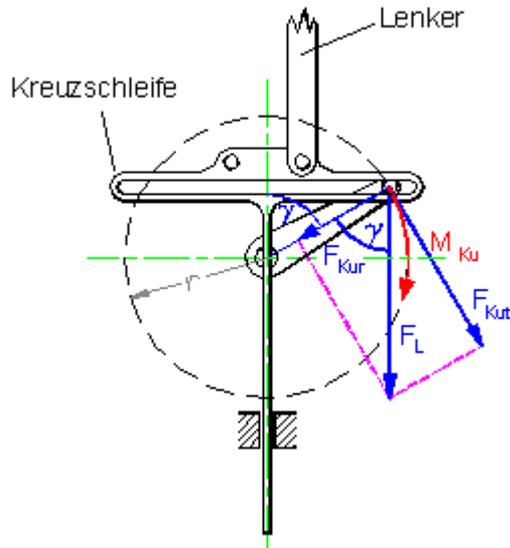


Abb. 3-2 Die aus der Kraft des Lenkers resultierenden Kurbelkräfte

Verwendet man zur Beschreibung des Kurbeldrehwinkels γ den Phasenwinkel Φ (groß Phi), so gilt, wenn man mit dem Aufschlag und mit senkrecht nach oben stehendem Kurbelarm bei $\gamma = 0$ Grad beginnt,

$$\gamma_i = \Phi_i + \frac{\pi}{2}$$

Für die tangential wirkende Kraft F_{Kt} am Kurbelzapfen ergibt das

$$F_{Kut} = F_L \cdot \cos(-\Phi) \blacksquare$$

bzw. weil die Kurbeldrehrichtung gleichgültig ist

$$F_{Kut_i} = F_{L_i} \cdot \cos(\Phi_i)$$

Setzt man darin obige Beschreibung der Lenkerkraft ein

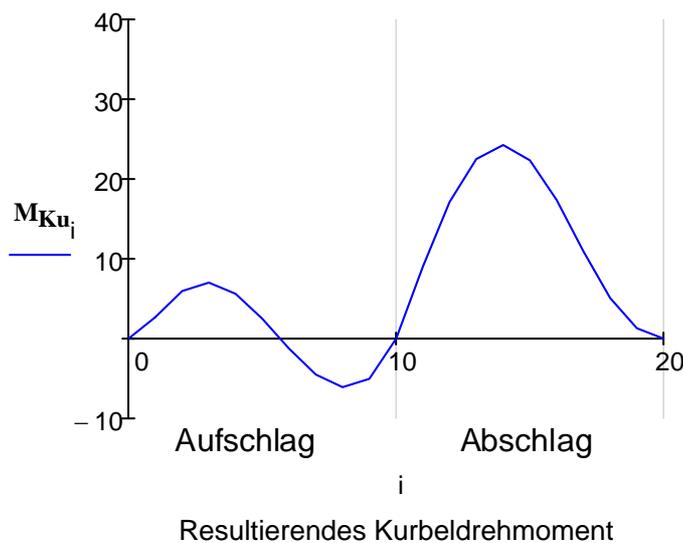
$$F_{Kut} = \frac{M_{Schlges} \cdot \cos(\Phi)}{H_2 \cdot \cos(\phi)} \blacksquare$$

so erhält man an der Kurbel mit dem Hebelarm r , das vom Flügel erzeugte Kurbeldrehmoment M_{Ku} [Nm].

$$M_{Ku} = M_{Schlges} \cdot \frac{r \cdot \cos(\Phi)}{H_2 \cdot \cos(\phi)} \blacksquare$$

bzw. in ausführlicher Schreibweise und mit dem Vorzeichen aus der Sicht des Antriebs.

$$M_{Ku_i} = - \left(M_{Schlges_i} \cdot \frac{r \cdot \cos(\Phi_i)}{H_2 \cdot \cos(\phi_i)} \right)$$



Der aus dem Schlagmoment des Flügels resultierende Kurbeldrehmomentverlauf ist relativ ungünstig.

- Das Kurbeldrehmoment wird in den Schlagendlagen immer zu Null. Die Kurbel durchläuft dort ihre Totpunkte. Ein Antriebsdrehmoment ist an diesen Stellen nur noch zur Überwindung von Reibung erforderlich.
- Die mittlere Motorbelastung in den einzelnen Takten lässt sich am Flächeninhalt unter dem Kurvenzug ablesen. Beim Aufschlag summieren sich positive und negative Fläche annähernd zu Null. Der Motor muss praktisch die gesamte Antriebsenergie des Flugmodells beim Abschlag erbringen. Der Wirkungsgrad des Motors ist entsprechend reduziert.
- Infolge der ungleichen Belastung wird der Abschlag langsamer ausgeführt als der Aufschlag - zumindest bei einem ungeregelten, trägheitsarmen Antrieb.
- Auch die Spitzenlast, nach der alle Bauteile auf dem Energieweg ausgelegt werden müssen - also Akku, Kabel, Motorsteller, Motor, Getriebe, Kurbel und Mechanik - ist relativ hoch.
- Beim Aufschlag wechselt das Kurbeldrehmoment sein Vorzeichen. Nahe der oberen Endlage wirken bei diesem Takt die Trägheitskräfte der Flügelmasse und der Auftrieb nach oben. Der Flügel ist dort nicht anzutreiben, sondern kräftig abzubremesen.
- Ein negatives Kurbeldrehmoment bedeutet, dass der Antriebsmotor als Generator arbeiten soll. Dazu muss er in der Lage versetzt werden. Bei einem elektrischen Antrieb sind nicht alle Motorsteller geeignet, einen entsprechenden Stromfluss zu verarbeiten. Den rückfließenden Strom nur in Wärme umzuwandeln würde zu weiteren Verlusten führen.
- Außerdem bedeutet der Vorzeichenwechsel beim Aufschlag einen Lastwechsel im Getriebe. Dies erfordert womöglich eine größere Getriebebaugröße.

Es ist nun zu prüfen, wie sich die Nachteile des Kurbelantriebs vermeiden lassen.

4. Drehmomentfeder

Selbst bei gleicher mittlerer Belastung von Auf- und Abschlag lässt sich der Nulldurchgang des Kurbeldrehmoments in den Kurbeltotpunkten praktisch nicht vermeiden. Es gibt aber mechanische Lösungen, die zumindest Motor und Getriebe gleichmäßiger belasten. Man baut dazu zwischen Getriebe und Kurbelantriebswelle eine Torsionsfeder als Energiespeicher ein.



Während der vollen Belastung im Bereich der Schlagmitte wird die Feder vielleicht eine viertel Umdrehung vom Antrieb gespannt. Die Kurbelbewegung wird dabei langsamer als die des Antriebs. Im Bereich der Kurbelotopunkte mit ihrem kleinem Kraftaufwand entspannt sich die Feder. Die Kurbeldrehbewegung wird dabei schneller als die Antriebsbewegung. Gleichzeitig stützt der Motor mit seinem Drehmoment die Feder weiter ab. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jedem Takt.

Es kommt dabei zu einer Deformation des vielleicht angestrebten, zeitlich sinusförmigen Bewegungsablaufes. Er wird wahrscheinlich rechteckförmiger. Das bringt auch bei der Flügelverwindung Vorteile. Der Antrieb wird jedenfalls gleichmäßiger belastet. Dieses Konzept wird aber hier nicht weiter verfolgt.

Anmerkung

Als Folge der ungleichen Antriebsbelastung ist im Schlagflug ein deutlich rhythmisches Getriebegeräusch zu hören. Das ist im allgemeinen zwar störend, hat aber einen Vorteil. Man kann mit Hilfe einer Tonaufnahme und eines Tonanalyseprogramms sehr gut Schlagfrequenzmessungen im Flug vornehmen (praktiziert von Nathan Chronister).

5. Kompensationsfeder

Durch seine Aufgabe Auftrieb zu erzeugen, wirkt auf den Schlagflügel fast ständig eine Kraft nach oben. Beim Aufschlag ist sie klein - vielleicht kurzzeitig auch mal negativ - und beim Abschlag sehr groß. Um die daraus resultierende, stark wechselnde Antriebsbelastung zu vergleichmäßigen, verwendet man zweckmäßig eine sogenannte "Kompensationsfeder". Sie ist so anzuordnen, dass sie etwa die Auftriebskräfte im Gleitflug kompensiert.

Beim Aufschlag wird die Kompensationsfeder, vor allem durch die Energie des Motors und im geringen Maße gegebenenfalls auch durch die Windradarbeit des Flügels, gespannt. Die Feder speichert die dabei aufgewendete Energie. Beim Abschlag unterstützt sie dann den Antrieb und gibt ihre Energie wieder ab. Die Belastung für den Antrieb wird auf diese Weise gleichmäßiger.

Dies wirkt sich sehr positiv auf die Antriebsbemessung aus. Im Regelfalle kann mehr Gewicht als das der Kompensationsfeder eingespart werden. Darüber hinaus ist der jeweilige Platzgewinn bzw. -bedarf zu berücksichtigen (siehe Ornithoptermodelle ab **EV1** auf der Website <http://www.ornithopter.de>). Auch die Verbesserung des Wirkungsgrades und die vereinfachte Einstellung der gestreckten Flügelstellung für den Gleitflug ist mit zu bewerten.

Eine Kompensationsfeder kann - je nach Auslegung der Federrate - sowohl das Schlagmoment vergleichmäßigen, als auch die Beschleunigung der Flügelmassen in der oberen Flügelendlage unterstützen. Letzteres wird insbesondere durch eine nicht-konstante Federrate erreicht (wie z. B. bei Gasdruckfedern).

Beschränkt man sich auf die Kompensationsaufgabe, so ist es zweckmäßig die Federrate möglichst klein zu machen. Sie wirkt dann bis in die Bereiche der beiden Endlagen mit etwa gleicher Stärke. Es wird ja in **Orni 2** davon ausgegangen, dass in beiden Flügelendlagen, wenn der Flügel kurzzeitig still steht, der Auftrieb des Gleitfluges vorliegt.

Als Grundlage zur Berechnung der Kompensationsfeder wird das Schlagmoment der Auftriebskraft im Gleitflug verwendet. Es kann aber in dem hier genutzten Zusammenhang um das Schlagmoment der Flügelgewichtskraft reduziert werden. Beim Heben und Senken der Flügelmasse läuft ja ein ähnlicher Energiefluss ab, wie in der Kompensationsfeder. Auch beim Heben der Flügelmasse wird Energie gespeichert und beim Senken wieder abgegeben.

Da das Modell im Gleitflug mit gestrecktem Flügel fliegt und der Lenker immer senkrecht stehend angenommen wird, kann man die betreffende Lenkerkraft F_{LG} sehr einfach ermitteln. Dazu werden folgende Größe verwendet.



Schlagmoment der Auftriebskraft im Gleitflug

$$M_{Schl_G} = 23.2 \cdot N \cdot m$$

Flügelgewichtskraft

$$F_{GF} = 7.8 \cdot N$$

relativer Schwerpunktabstand des Flügels vom Schlaglager

$$r_{mFr} = 0.44$$

Halbspannweite

$$s = 1.4 \text{ m}$$

$$F_{LG} = \frac{M_{SchlG} - F_{GF} \cdot r_{mFr} \cdot s}{H_2}$$

$$F_{LG} = 380 \cdot N$$

Um die Federrate zu bestimmen, wird auch noch die maximale Abweichung der Kompensationsfederkraft in den Schlagendlagen geschätzt. Sie wird mit dem Faktor ΔF beschrieben, der Anteil der mittleren Federkraft angibt.

$$\Delta F = 0.3$$

$$F_{LKmax} = F_{LG} \cdot (1 + \Delta F)$$

$$F_{LKmin} = F_{LG} \cdot (1 - \Delta F)$$

Bei einem Federweg der Kompensationsfeder von $2r$ ist die Federate D

$$D_{Ko} = \frac{F_{LKmax} - F_{LKmin}}{2r}$$

$$D_{Ko} = 4.7 \cdot \frac{N}{mm}$$

Mit der maximalen Federkraft und der Federate kann man zusammen mit den übrigen, konstruktiv festzulegenden Federdaten eine geeignete Kompensationsfeder auswählen.

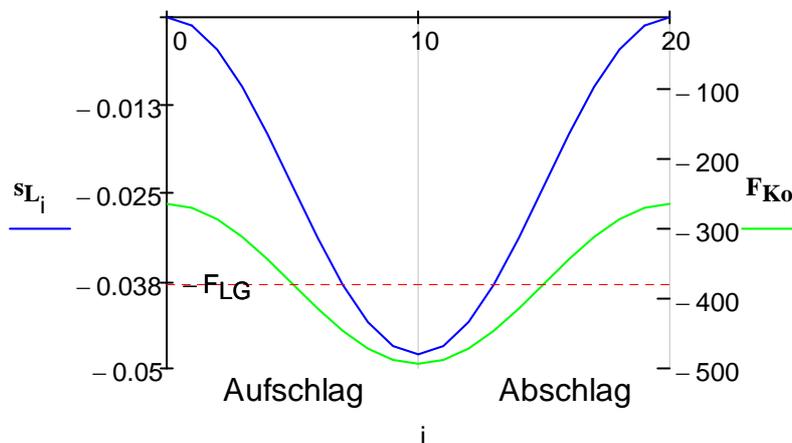
Um den Federkraftverlauf darzustellen muss vorher noch der Wegverlauf des Lenkers beschrieben werden. Er ergibt sich aus dem senkrechten Weganteil des mit konstanter Geschwindigkeit drehenden Kurbelzapfens. Als Nullpunkt des Lenkerweges s_L wird der Beginn des Aufschlags gewählt.

$$s_{L_i} = -r \cdot (1 - \cos(\gamma_i))$$

Der Verlauf der Kompensationsfederkraft folgt dann aus

$$F_{Ko_i} = -(F_{LKmin} - D_{Ko} \cdot s_{L_i})$$

Das negative Vorzeichen der Kompensationsfederkraft ist erforderlich, da die Kompensationsfeder den Flügel nach unten drückt und nur nach oben wirkende Kräfte positiv gewertet werden.



Kompensationsfeder -Weg und -Kraft



6. Endlagenfeder

Infolge der wechselnden Schlagrichtung muss die Masse des Flügels immer wieder beschleunigt und verzögert werden. Bei großen Schlagflügelmodellen hat das dafür erforderliche Moment einen wesentlichen Anteil am Gesamtschlagmoment. Die Beschleunigungsarbeit kann aber auch von federnden Bauelementen übernommen werden.

In nachstehender Abbildung ist eine entsprechende Anordnung dargestellt. Sie zeigt den Energiefluss und die Bewegung einer zwischen zwei Federn schwingenden Masse "m". Es ist die klassische Darstellung einer mechanischen Schwingung. In der Praxis wird zwar die Flügelmasse auf einem Kreisbogen bewegt, zur Demonstration genügt aber diese einfache lineare Anordnung.

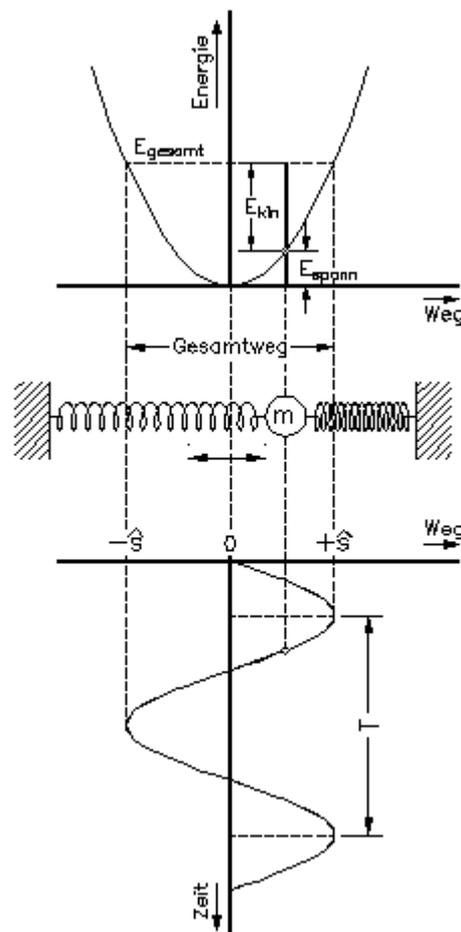


Abb. 6-1 Energiefluss einer schwingenden Masse und ihre Weg-Zeit-Funktion

Werden die Federn auf die Flügelmasse und die Schlagperiode abgestimmt, so braucht der übrige Antrieb keinerlei Beschleunigungskräfte aufbringen. Der pendelnde Energiefluss der Schwingung läuft ohne Energiezufuhr von außen ab - aber nicht die Erzeugung der aerodynamischen Kräfte.

Die aerodynamischen Kräfte des Schlagflügels stellen für seine Schwingungseigenschaften eine sehr starke Dämpfung dar. Gerade diese besteht aber aus den eigentlich gewünschten Kräften, nämlich aus dem Auftrieb und dem Schub. Für diese "Dämpfungskräfte" ist auch bei Anwendung von Endlagenfedern eine ständige Energiezufuhr erforderlich. Die Schwingungskräfte sind nur überlagert.

Die oben abgebildeten Federn sind immer gleichzeitig im Eingriff. In folgender Beschreibung wird generell nur von einer Feder je Endlage gesprochen die einzeln aktiv sind. Um ihre Federdaten zu bestimmen, werden Gleichungen des Schwingkreises angewendet (z. B. Handbuch, Abschnitt 5.2).



Folgende Daten sind dabei erforderlich.

Trägheitsmoment des ganzen Flügels

$$J_F = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$$

maximale Winkelgeschwindigkeit des Flügels

$$\omega_{\max} = 4.9 \text{ s}^{-1}$$

Der Federweg entspricht dem Kurbelradius

$$r = 24.0 \cdot \text{mm}$$

Damit lässt sich die Federrate D_{End} einer Endlagenfeder fast unabhängig von dem hier beschriebenen Antrieb berechnen.

$$D_{\text{End}} = J_F \cdot \left(\frac{\omega_{\max}}{r} \right)^2$$

$$D_{\text{End}} = 21.0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

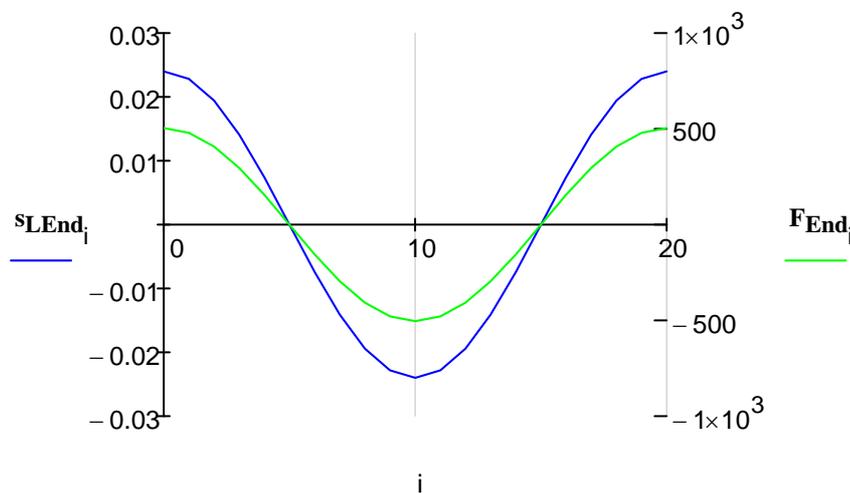
Die ungespannte Länge der Feder, der Draht- und der Wicklungsdurchmesser usw. richten sich nach der jeweiligen Antriebskonstruktion. Sie werden hier nicht festgelegt. Zusammen mit diesen Daten kann aber dann eine geeignete Endlagenfeder ausgewählt werden.

Der Federwegverlauf bzw. der Weg des Lenkers s_{LEnd_i} der für die Endlagenfeder maßgebend ist, lässt sich mit Hilfe des senkrechten Anteils der Kurbeldrehbewegung beschreiben. Als Nullpunkt des Weges wird zweckmäßig die gestreckte Flügelstellung - also die Mittellage - verwendet. Dort beginnen beide Endlagenfedern mit ihrem Federweg.

$$s_{\text{LEnd}_i} = r \cdot \cos(\gamma_i)$$

Die Kraftentwicklung der beiden senkrecht angeordneten Endlagenfedern verläuft nach der Gleichung.

$$F_{\text{End}_i} = s_{\text{LEnd}_i} \cdot D_{\text{End}}$$



Endlagenfeder -Weg und -Kraft

7. Kurbeldrehmomente

Als Ausgangsbasis für die Berechnung des Kurbeldrehmoments wurde zunächst die vom Flügel erzeugte Lenkerkraft F_L ermittelt. Diese wirkt auf den Rahmen, in dem die Federn und die Kreuzschleife eingebaut sind. Zur Lenkerkraft werden dort die Federkräfte addiert. Die resultierende Kraftsumme ist dann diejenige, die senkrecht von oben an den Kurbelzapfen weiter gegeben wird. Damit lassen sich nach obigem Schema die Kurbeldrehmomente berechnen.



Kurbeldrehmoment ohne Anwendung von Federn

$$M_{Ku_i} = -r \cdot F_{L_i} \cdot \cos(\Phi_i)$$

Kurbeldrehmoment bei Anwendung einer Kompensationsfeder

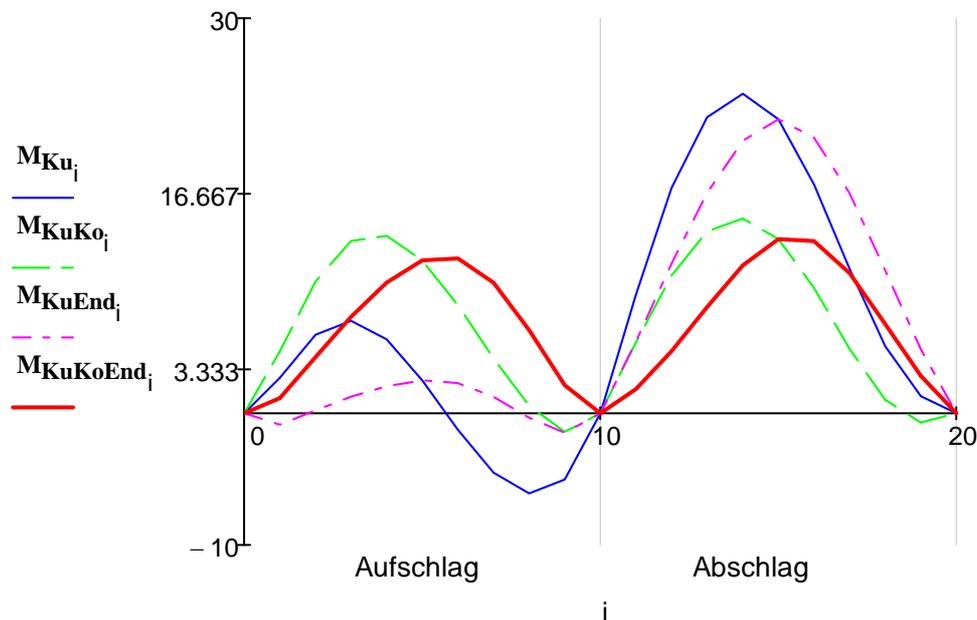
$$M_{KuKo_i} = -r \cdot (F_{L_i} + F_{Ko_i}) \cdot \cos(\Phi_i)$$

Kurbeldrehmoment bei Anwendung von Endlagenedern

$$M_{KuEnd_i} = -r \cdot (F_{L_i} + F_{End_i}) \cdot \cos(\Phi_i)$$

Kurbeldrehmoment bei Anwendung von Kompensations- und Endlagenedern

$$M_{KuKoEnd_i} = -r \cdot (F_{L_i} + F_{End_i} + F_{Ko_i}) \cdot \cos(\Phi_i)$$



- Wird die Mechanik nur mit Endlagenedern ausgestattet (M_{KuEnd_i}), so ist zwar der Lastwechsel beim Aufschlag schon recht klein, der Motor läuft aber bei diesem Takt fast im Leerlauf. Die ganze Antriebsleistung muss praktisch beim Abschlag erbracht werden. Das dort aufzuwendende Drehmoment ist entsprechend hoch.
- Nur mit der Kompensationsfeder ausgestattet (M_{KuKo_i}), ist die Belastung bei Auf- und Abschlag annähernd gleich und von mittlerer Größe. Es kommt aber immer noch zu einem kleinen Lastwechsel.
- Dagegen tritt bei kombinierter Anwendung von Kompensations- und Endlagenedern ($M_{KuKoEnd_i}$) nur noch eine mittlere, schwelende und in beiden Takten nahezu symmetrische Belastung auf. Mit der Anwendung von Kompensations- und Endlagenedern wird also die Drehmomentbelastung für Motor und Getriebe deutlich reduziert.



Mit diesem Resultat ist bei der Konzeption des Antriebs zu prüfen, ob ein Drehzahlregler (nicht Drehzahlsteller) verwendet werden soll. Andernfalls ist mit starken Drehzahlschwankungen und entsprechenden Verzerrungen des Schlagflügel-Bewegungsablaufes zu rechnen. Eine Verbesserung bringt aber auch schon ein Schwungrad (Lüfterrad) oder ein relativ schwerer Rotor des Motors mit großem Durchmesser.

8. Kurbelantriebsleistung

Zur Kontrolle kann man abschließend noch die Kurbelantriebsleistung berechnen. Ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrades sollte sie der Leistung für aerodynamische Kräfte P_A entsprechen, wie sie im Programm **Orni 2** ermittelt wurde.

$$P_A = 65.1 \cdot W$$

Die Leistung an der Kurbel ergibt sich aus ihrem Drehmoment und ihrer Winkelgeschwindigkeit (mit der Schlagperiodendauer = T bzw. der Drehzahl = $1/T$).

$$T = 0.7 \text{ s}$$

$$P_{Ku_i} = M_{KuKoEnd_i} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

Der Mittelwert ist die Summe der Leistungen in den Betrachtungszeitpunkten, dividiert durch die Anzahl der Betrachtungszeitpunkte.

$$P_m = \frac{\sum_{i=0}^z P_{Ku_i}}{z} \quad P_m = 64.5 \cdot W$$

Der Unterschied zur Leistung der aerodynamischen Kräfte wird kleiner bei Erhöhung der Betrachtungszeitpunkte (Rechengenauigkeit).

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades η ergibt das für die Motoreingangsleistung.

$$P_{Mot2} = \frac{P_m}{\eta_{Antr}} \quad P_{Mot2} = 129 \cdot W$$

Das entspricht etwa der Motorleistung P_{Mot} , wie sie im Programm **Orni 2** ermittelt wurde

$$P_{Mot} = 130 \cdot W$$