

Helmut Schenk

Die Phygoide : "Alles geregelt" *

Es ist erstaunlich: Da gibt es einen Effekt bei der Längsstabilität unserer Modelle, der allen Modellfliegern mehr oder weniger Frust bereitet oder wenigstens "Pilotierarbeit" abverlangt. Die aber scheinen ihn zu ignorieren oder hinzunehmen (Zitat aus einem Zeitschriftenbeitrag: "...damit müssen wir leben"). In der Modellflugliteratur findet sich sogar wie nichts darüber, auch für die Experten ist diese Erscheinung kaum ein Thema.

Die Rede ist von der sog. "Phygoide". Sie ist verantwortlich dafür, daß wir nach jeder Kurve, nach jeder stärkeren Bö zum Höhenruderknüppel greifen müssen, daß man Anfängern rät, für's erste einmal die Hand vom Höhenruder zu lassen, daß Modelle manchmal scheinbar unerwartet wegsteigen oder durchsacken, u.a.m. Eigentlich Grund genug, uns einmal damit zu befassen. Und wenn dann noch gezeigt wird, wie sich diese unangenehme Erscheinung beseitigen läßt, so sollte das Thema doppelt interessant sein.

Statische und dynamische Längsstabilität

Wenn es im Modellflug um Längsstabilität geht, so ist damit in der Regel die sog. *statische Längsstabilität* gemeint, die oft auch als *Anstellwinkelstabilität* bezeichnet wird. Hierunter versteht man, daß nach einer Störung der Längsgleichgewichtslage ohne Zutun des Piloten ein Drehmoment um den Schwerpunkt auftritt, welches das Modell in seine ursprüngliche Lage zurückdreht. Für dieses Moment sorgt normalerweise das Höhenleitwerk in Verbindung mit einer richtig gewählten Schwerpunktlage. Die statische Längsstabilität ist in der Modellflugliteratur schon oft und ausgiebig behandelt worden (z.B. in [1], [2], [3]), sodaß wir uns hier nicht weiter damit beschäftigen müssen.

Nun weiß jeder Modellflieger, daß aber trotz vorhandener statischer Längsstabilität der Pilot noch reichlich mit dem Höhenruder beschäftigt ist. Womit natürlich das "Wegsteuern" von ungewolltem Auf- und Ab gemeint ist, und nicht etwa das Fliegen von irgendwelchen gewollten Manövern. Die einfache Vorstellung vom "Zurückdrehen in die Trimmlage" kann auch nicht so ganz der Realität gerecht sein; denn ein Modell müsste danach umso besser stabilisieren, je höher die statische Längsstabilität ist. Durch entsprechende Schwerpunktlage ließe sich das fast immer erreichen. Zumindest die Erfahrung lehrt aber, daß die Flugeigenschaften wieder schlechter werden, wenn die statische Längsstabilität zu groß wird.

Seit einiger Zeit werden von Modellfliegern in zunehmendem Maß Flugbahnmessungen von Modellen -insbesondere Segelflugmodellen- gemacht. Wann immer diese Messungen mit einer ausreichend hohen Höhenauflösung gemacht wurden, zeigte sich dasselbe: Die Gleitflugbahn (als einfachstes Beispiel) ist nur teilweise wie erwartet eine gleichförmige, abwärtsgeneigte Gerade, sondern größtenteils eine Wellenlinie. Deren "Wellen" sind viel zu häufig, gleichartig und systematisch, als daß es sich um Auf- oder Abwinde handeln könnte.

* Kopie eines Beitrags aus "FMT-Kolleg Nr. 19/1995
Das im Anhang erwähnte Simulationsprogramm ist nicht mehr erhältlich

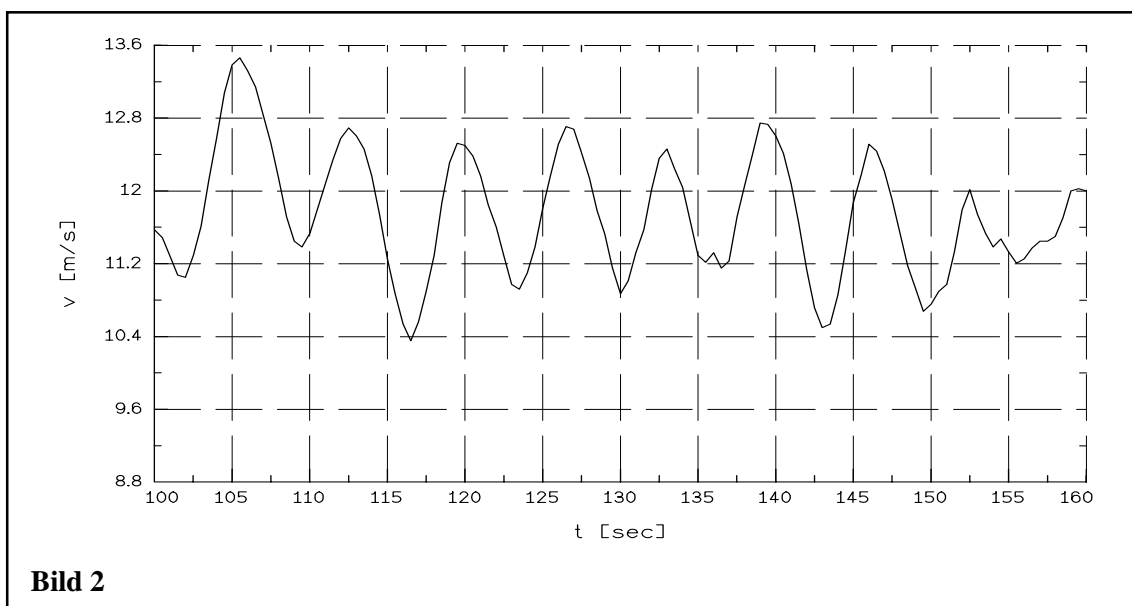
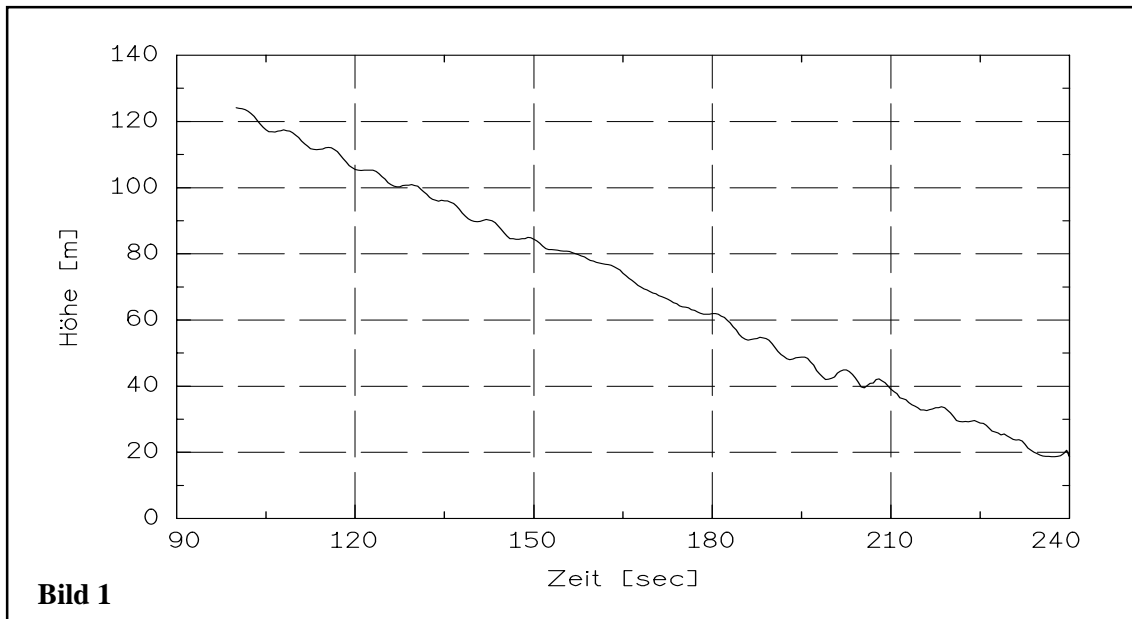


Bild 1 zeigt einen Ausschnitt aus einer solchen Flugbahnmessung von H.P. Senn [4]. Schaut man sich die ebenfalls gemessene und aufgezeichnete Fluggeschwindigkeit an (Bild 2, von einem anderen Flug), so ist zu sehen, daß auch sie erhebliche Schwankungen aufweist.

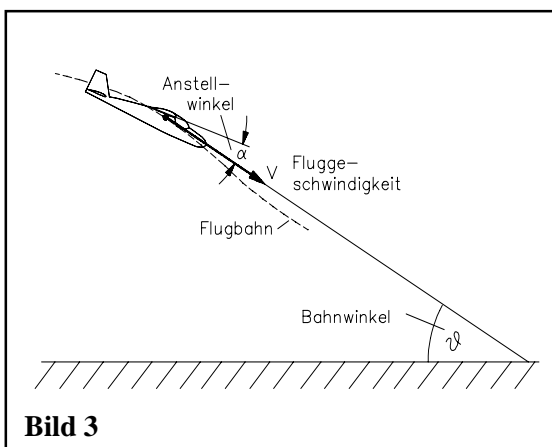
Um solche Erscheinungen erklären und zu verstehen zu können, müssen wir in die sog. *dynamische Längsstabilität* einsteigen. Hierunter versteht man die Theorie der *Bewegungsformen*, die nach einer Störung der Längsgleichgewichtslage auftreten. Leider ist diese Theorie im allgemeinen nicht ganz einfach und erfordert solide Kenntnisse in Flugmechanik und höherer Mathematik. Wir werden aber sehen, daß man sich auch ohne Mathematik eine sehr anschauliche Vorstellung dieser Vorgänge machen kann. Auch die Rechnerei bleibt in Grenzen, wenn wir uns auf das praktisch Wichtige beschränken und den Computer bemühen.

Die Freiheitsgrade der Längsbewegung

Im folgenden wollen wir uns zur Vereinfachung auf den Idealfall der “symmetrischen Längsbewegung” beschränken. Einfacher gesagt, das Modell soll keine Kurve fliegen, keinen Flügel hängen lassen und nicht schieben.

Zur Beschreibung dieser Bewegung werden bei Starrflächen-Flugzeugen üblicherweise die drei Variablen *Bahngeschwindigkeit*, *Bahnwinkel* und *Anstellwinkel* verwendet. Anstatt von *Bahngeschwindigkeit* wird oft auch von *Fluggeschwindigkeit* gesprochen.

Nur der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß dies nicht die einzige Möglichkeit ist; andere Variable wären ebenfalls möglich und werden auch verwendet; z.B. bei Vertikalstartern. In unserem Fall sind die genannten Variablen (Freiheitsgrade) jedoch besonders geeignet.



Das Modell fliegt auf einer im allgemeinen nicht geradlinigen (aber in der Symmetrieebene liegenden) Bahn, die Richtung der Fluggeschwindigkeit fällt in Bahnrichtung, vgl. Bild 3. Die Geschwindigkeit ändert sich im allgemeinen im Verlauf der Flugbahn. Unter dem Bahnwinkel versteht man den Winkel der Flugbahn zum Erdboden. Auch er ist im allgemeinen veränderlich; nur in Sonderfällen (z.B. gleichförmigem Gleitflug) hat er einen konstanten Wert.

Der Anstellwinkel schließlich gibt den Winkel zwischen der Flugbahn und einer geeigneten Bezugslinie am Modell an; meistens ist dies eine Profilsehne des Tragflügels.

Manchmal werden Bahn- und Anstellwinkel verwechselt oder gleichgesetzt, was natürlich nicht richtig ist und zu völlig falschen Schlüssen führen kann. Den Unterschied können wir uns vor Augen führen, wenn wir uns z.B. den Steigflug eines sehr stark motorisierten Modells ansehen. Der Bahnwinkel ist in diesem Fall sehr groß, z.B. 70, 80 oder gar 90 Grad, während der Anstellwinkel und damit der Auftrieb sehr klein oder sogar Null ist. Der große Bahnwinkel ist möglich, weil das Modell größtenteils oder ganz vom Schub des Antriebs getragen wird.

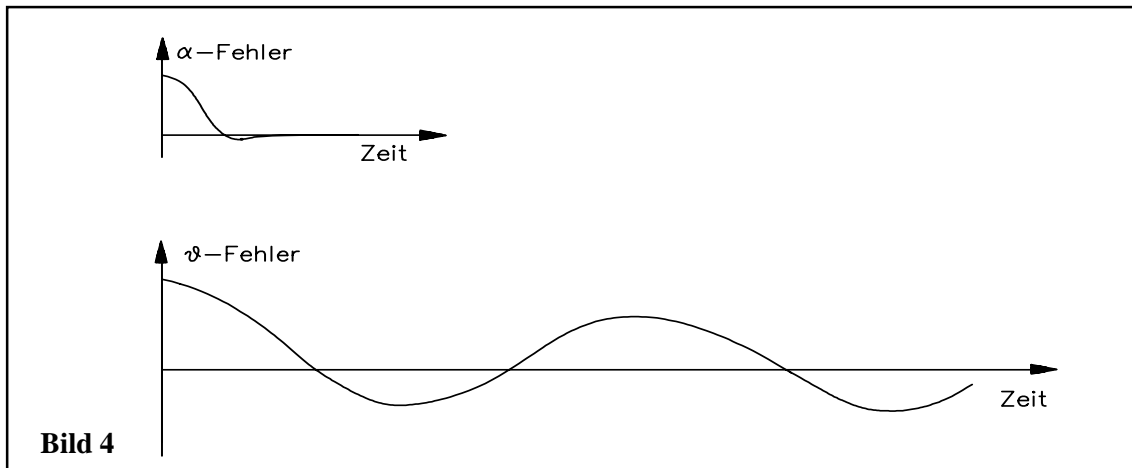
Die Bewegung nach einer Störung

Wir wollen uns dies anhand eines sehr einfachen, aber typischen Beispiels ansehen, nämlich dem Gleitflug eines Segelmodells. Ausgangszustand soll der gleichförmige Gleitflug sein: Auftrieb, Widerstand und Gewicht sind im Kräftegleichgewicht, alle Längsmomente sind ebenfalls im Gleichgewicht.

Tritt nun eine Störung auf, z.B. durch eine Bö oder durch einen Steuerausschlag, so wird dieses Gleichgewicht zerstört. Das Modell wird aus seiner Gleichgewichtslage gedreht, und es wird mehr oder weniger aus seiner Bahn geworfen. Nichts “paßt” mehr zusammen: Die Geschwindigkeit ist zu groß oder zu klein, der Anstellwinkel ebenso, und der Bahnwinkel weicht vom seitherigen Wert ab.

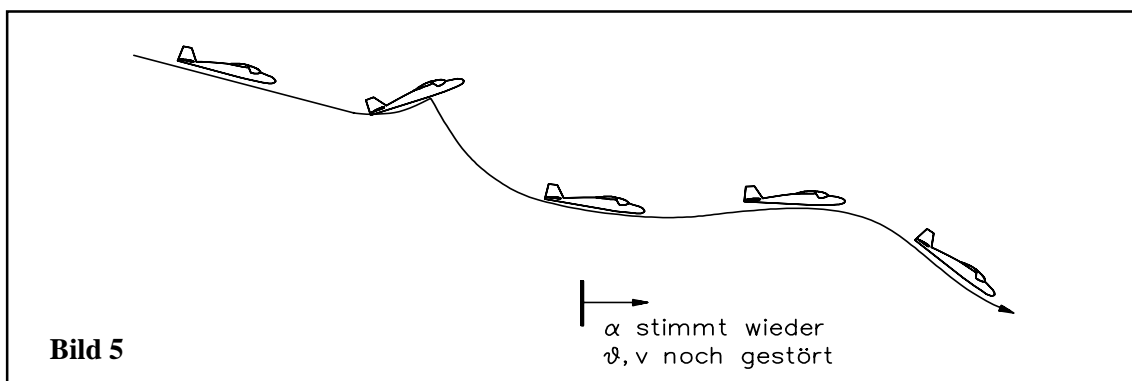
Nach einiger Zeit und nach mehr oder weniger großen “Ausgleichsbewegungen” kehrt es dann (hoffentlich) in seinen ursprünglichen Gleichgewichtszustand zurück.

Die Theorie der dynamischen Längsstabilität lehrt nun, daß diese Ausgleichsbewegungen aus zwei Schwingungsbewegungen bestehen, die gleichzeitig auftreten und sich in gewissem Maß gegenseitig beeinflussen, Bild 4 und 5. Diese Schwingungen überlagern sich der “ungestörten” Flugbahn :



1. Eine Schwingung des Anstellwinkels; dieser wird periodisch größer und kleiner. Da der Anstellwinkel üblicherweise mit α bezeichnet wird, nennt man diese Schwingung in der Fachsprache meistens α - Schwingung.

2. Eine Schwingung von Fluggeschwindigkeit und Bahn. Das Modell wird abwechselnd langsamer und schneller und steigt und fällt dabei. Diese Schwingung wird als “*langsame Bahnschwingung*” oder “*Phygoide*” bezeichnet. Warum sie den Zusatz “langsame” hat, wird gleich noch erklärt. Die Bezeichnung “Phygoide” wurde von dem englischen Professor und Flugpionier *Lanchester* geprägt, der sich vor rund 90 Jahren u.a. schon mit Problemen der Flugbahnen und Flugstabilität befaßt hat.



Falls wir nun den Verlauf dieser Schwingungen in allen Details und zu jedem Zeitpunkt wissen wollen, so führt an höherer Mathematik, Schwingungslehre und Aerodynamik kein Weg vorbei. Wir wollen uns das jedoch nicht antun und uns zunächst nur das Wesentliche

am Ergebnis ansehen. Es ergibt sich nämlich fast immer dasselbe “Verhaltensmuster”, das gut überschaubar ist, und das uns die weiteren Überlegungen sehr erleichtert.

Die Anstellwinkelschwingung

erfolgt mit einer relativ hohen Frequenz; bei Modellen beträgt diese typisch einige Schwingungen pro Sekunde (daher die Zusatzbezeichnung *schnelle* α -Schwingung). Sie ist gut bis stark gedämpft; klingt also schnell ab und ist nach ca. 1 Sekunde schon fast wieder verschwunden, d.h. der Anstellwinkel “stimmt” sehr schnell wieder. Das bedeutet aber leider noch nicht, daß nun alles wieder in Ordnung wäre, denn dieser Anstellwinkel bezieht sich auf die *gestörte* Flugbahn. Das schnelle Abklingen der Anstellwinkelschwingung ist Folge der Anstellwinkelstabilität, die im Regelfall immer hoch ist, sowie der ebenfalls hohen Drehdämpfung des Höhenleitwerks.

In der Praxis ist es schwierig, die α -Schwingung überhaupt zu erkennen, da sie nur aus einer kurzen Drehung besteht, die der Bahnschwingung überlagert ist. In Sonderfällen, in denen die Nickdämpfung mangelhaft ist (z.B. gelegentlich bei Nurflüglern), dauert sie jedoch länger an und kann dann auch gut beobachtet werden. Es mag den Einen oder Anderen etwas überraschen; aber der ursprüngliche Anstellwinkel ist tatsächlich schon nach 1-2 Sekunden wieder vorhanden, obwohl das Modell dann noch sichtbar “pumpt”.

Die Fluggeschwindigkeits-/Bahnschwingung (Phygoide)

erfolgt vergleichsweise sehr langsam. Eine Schwingung dauert bei Segelflugmodellen typisch etwa 5-7 Sekunden; ihre Frequenz beträgt damit etwa 0.15 - 0.2 Hz. Diese Schwingung ist im Regelfall schlecht gedämpft, dauert also wesentlich länger an als die oben beschriebene α -Schwingung. Macht das Modell z.B. 3 solche Bahnschwingungen (was real ist), dann dauert dies 15 - 20 Sekunden, und oft ist dann schon die nächste Störung da. In Verbindung mit dieser Schwingung wird oft auch der Begriff der *Bahnstabilität* gebraucht.

Nun haben nicht nur Böen, sondern z.B. auch nicht exakt ausgesteuerte Kurven o.ä. Bahnstörungen zur Folge; das Modell fliegt also fast ständig auf- und ab und wird dabei abwechselnd langsamer und schneller. Wer schon Telemetrieaufzeichnungen von Modellen gesehen hat, der weiß, daß dies nicht nur Theorie, sondern ständige Praxis ist, siehe Bild 1. Auch Besitzern eines nicht fahrtkompensierten Variometers ist dieses ständige Auf und Ab nicht ganz unbekannt.

Etwas überspitzt könnte man sagen, daß die Phygoide den gesamten Modellflug beherrscht; es gibt fast keine Flugphase, in der sie nicht den Flug beeinflusst. Der größte Teil der Höhenrudereingriffe des Piloten dient dazu, die Phygoide wegzusteuern.

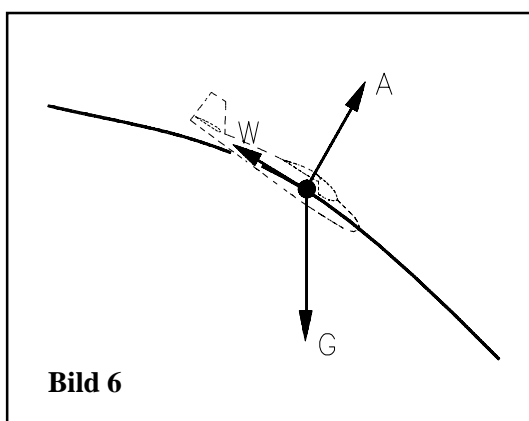
Denken Sie zurück an die Zeit, als Sie das Steuern gelernt haben: Einen erheblichen Teil der Lernzeit haben Sie dazu verwendet, um zu lernen, wann und wieviel “nachgedrückt” oder “gezogen” werden muß. Falls wir steuerfaul sind und trotzdem ein ruhiges Flugbild wollen, sollten wir daher etwas gegen die Phygoide tun; wir sollten die Bahnstabilität verbessern.

Wir können weiter vereinfachen

Zunächst wollen wir aber noch etwas weiter überlegen und dabei das Problem vereinfachen. Wir setzen hierbei ausreichende Anstellwinkel- (statische) Stabilität voraus, was normalerweise in der Praxis stets erfüllt ist. Wir erinnern uns auch daran, daß nach einer Störung der richtige Anstellwinkel sich sehr schnell wieder einstellt.

Während das Modell nun auf der Phygoidenbahn auf- und abschwingt, dreht es sich um seine Querachse. Dies erfolgt aber so langsam (nämlich mit der Schwingungszeit der Bahnschwingung), daß keine nennenswerten Drehbeschleunigungen und Drehmomente auftreten. Für das Höhenleitwerk ist es keinerlei Problem, den Soll-Anstellwinkel auch weiterhin einzuhalten; es führt gewissermaßen ständig den Anstellwinkel dem sich ändernden Bahnwinkel nach.

Der Anstellwinkel ist praktisch konstant, und damit sind auch c_a und c_w konstant. Überdies haben beide dabei dieselben Werte wie im ungestörten Flug.



Wir brauchen uns daher um das Momentengleichgewicht am Modell nicht mehr zu kümmern, denn alle Drehmomente befinden sich im Gleichgewicht. Es bleiben “nur” noch die Kräfte und ihr Gleichgewicht als Einflußgrößen übrig.

Wir können das Modell in Gedanken auf einen “Massenpunkt” -repräsentiert durch seinen Schwerpunkt- schrumpfen lassen, an dem die uns geläufigen Kräfte wie z.B. Gewicht, Auftrieb und Widerstand angreifen; Bild 6.

Die langsame Bahnschwingung erfolgt fast ausschließlich unter dem Einfluß dieser Kräfte. Ähnlich wie bei einem Pendel schwingt der Schwerpunkt auf und ab. Geht das Modell nach unten, so nimmt es Fahrt auf, und Lageenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Umgekehrt verwandelt sich Bewegungsenergie wieder in Lageenergie, wenn es nach oben steigt und dabei Fahrt verliert. In den “Endlagen” der Schwingung sind entweder die Fahrt zu klein und die Höhe zu groß bzw. umgekehrt, als daß es gleichförmig weiterfliegen könnte. Wäre da nicht noch der Luftwiderstand, so würde dieses Auf und Ab ohne Zutun des Piloten bis in alle Ewigkeit weitergehen. Daß in der Praxis der Pilot durch einen Schuß “Drücken” oder “Ziehen” im richtigen Moment die Schwingung beendet, soll uns hier nicht interessieren.

Aerodynamisch hochwertig = schlechte Dämpfung der Phygoide

Damit wird auch klar, warum die Bahnschwingung schlecht gedämpft ist. Soll die Schwingung ohne Eingriff des Piloten ein Ende finden, so muß das Modell die in der Schwingung steckende Energie (Fahrt- oder Höhenüberschuß) irgendwie wieder loswerden. Wie aber kann es das? Die einzige Möglichkeit hierfür ist -beim Segelmodell- der Luftwiderstand. Wegen der quadratischen Abhängigkeit des Widerstands von der Geschwindigkeit ist dieser in der Phase der Übergeschwindigkeit größer als während der verminderten Fahrt; dadurch verliert es allmählich an Schwingungsenergie und nähert sich wieder der gleichförmigen Bahn. Je aerodynamisch hochwertiger nun das Modell ist

Schwingungsenergie abgeführt werden, und desto schlechter ist die Phygoide gedämpft. Hochgezüchtete “Orchideen” haben mehr Probleme mit der Phygoide als “fliegende Drahtverhaue”.

Die Phygoide ohne Luftwiderstand

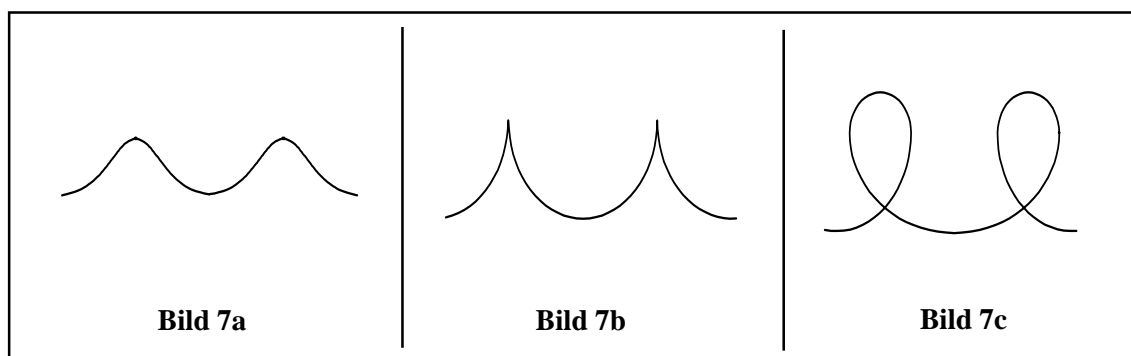
Wir wollen uns für einen Moment vorstellen, daß unser Modell mit einem kleinen Hilfsmotor ausgerüstet ist, der gerade so viel Schub erzeugt, daß es zum “Nullschieber” reicht. Der Antrieb kompensiert also gerade den Luftwiderstand. Aus praktischer Erfahrung können wir sagen, daß ein solcher Mini-Antrieb die sonstigen Eigenschaften kaum groß ändert. Für unsere Überlegung können wir damit aber auch noch den Luftwiderstand und den Motorschub wegnehmen, und es bleiben nur noch Auftrieb und Gewicht zu berücksichtigen. Wenigstens ein Teil dessen, was sich nach dieser extremen Vereinfachung des Problems ergibt, dürfte näherungsweise auch für unser reales Modell zutreffen.

Genau diese Vereinfachung hat Lanchester damals vorgenommen und damit seine “*Phygoiden ohne Luftwiderstand*” berechnet. Er hat diese Vereinfachung gemacht, weil die “*Phygoide mit Luftwiderstand*” auf Gleichungen führt, die nicht mehr “geschlossen” und mit einfachen Mitteln gelöst werden können.

Wir wollen nun nicht Lanchesters Rechnungen nachvollziehen, aber doch typische Ergebnisse ansehen, die insofern bemerkenswert sind, als sie zur damaligen Zeit rein theoretischer Art und nicht praktisch nachvollziehbar waren.

Bild 7a zeigt eine Bahn, wie sie nach einer kleinen Störung entsteht. Die Flugbahn ist sanft gewellt und ähnelt einer Sinusschwingung. Da kein Luftwiderstand berücksichtigt ist, verläuft sie im Mittel horizontal, und das bis in alle Ewigkeit. Man kann aber ahnen, daß sich im realen Fall (mit Luftwiderstand) in etwa eine solche Schwingung der geradlinigen Gleitbahn überlagert, ohne daß sich sonst viel ändert. Übrigens- es gibt natürlich auch eine “Phygoide aufwärts”, was wir uns leicht vorstellen können, wenn wir einen gewissen Schubüberschuss unseres Hilfsantriebs annehmen.

Nehmen wir eine stärkere Störung zu Beginn an, so entsteht eine Bahn wie in Bild 7b dargestellt. Die Scheitelpunkte werden nun zu einer Spitze. Wer genügend Nerven besitzt, um sein Modell zunächst ausreichend “aus der Bahn zu werfen” und dann die Hände vom Höhensteuer zu lassen, der kann solche Bahnen (“Männchen”) leicht in der Realität beobachten.



Looping möchte ja bekanntlich auch “durchgesteuert” werden).

Die Phygoide mit Luftwiderstand

Nachdem wir nun eine Vorstellung vom grundsätzlichen Verhalten haben, kehren wir zur realeren Bahnschwingung mit Luftwiderstand zurück, und etwas Mathematik wird unvermeidlich. Im folgenden wird gezeigt, wie man diese Bewegung (mit Computerhilfe) berechnen kann.

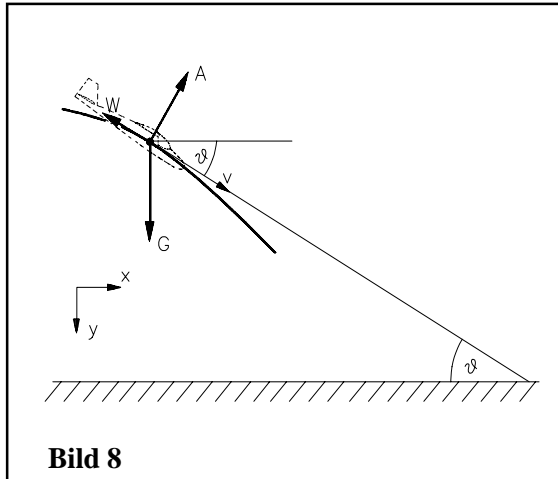


Bild 8

Um die Sache nicht zu sehr zu komplizieren, wollen wir beim Segelmodell bleiben, also keinen Antriebsschub berücksichtigen. Als am Modell angreifende Kräfte haben wir dann Gewicht, Auftrieb und Widerstand (Bild 8).

Das Modell fliegt mit der Bahngeschwindigkeit v , seine momentane Position ist durch die x - und y -Koordinaten gegeben, seine Flugrichtung durch den Bahnwinkel ϑ bestimmt.

Kräfte am Modell in x -Richtung

$$K_x = A \sin \vartheta - W \cos \vartheta \quad (1)$$

Kräfte am Modell in y -Richtung

$$K_y = G - A \cos \vartheta - W \sin \vartheta \quad (2)$$

Für die Beschleunigung gilt allgemein

$$b = \frac{K}{m} = K \frac{g}{G} \quad (g = \text{Erdbeschleunigung}) \quad (3)$$

Damit werden die x - und y -Komponenten der am Modell wirkenden Beschleunigung

$$b_x = g \frac{A \sin \vartheta - W \cos \vartheta}{G} \quad (4)$$

$$b_y = g \left(1 - \frac{A \cos \vartheta + W \sin \vartheta}{G} \right) \quad (5)$$

Dividieren wir durch die Erdbeschleunigung, so werden die Gleichungen dimensionslos

$$\frac{1}{g} b_x = \frac{A \sin \vartheta - W \cos \vartheta}{G} \quad (6)$$

$$\frac{1}{g} b_y = 1 - \frac{A \cos \vartheta + W \sin \vartheta}{G} \quad (7)$$

Für Auftrieb A , Widerstand W und (inverse) Gleitzahl ε gelten die bekannten Beziehungen

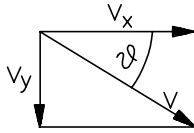
$$A = \frac{\rho}{2} v^2 F c_a \quad (8)$$

$$W = \frac{\rho}{2} v^2 F c_w \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{c_w}{c_a} \quad (10)$$

$$c_w = \varepsilon \cdot c_a \quad (11)$$

ferner sind



$$\sin \varphi = \frac{v_y}{v} \quad (12)$$

$$\cos \varphi = \frac{v_x}{v} \quad (13)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (14)$$

Werden diese Beziehungen in (6) und (7) eingesetzt, so wird

$$\frac{1}{g} b_x = \frac{\rho c_a}{2 G/F} \cdot v \cdot v_y - \frac{\rho c_a}{2 G/F} \cdot v \cdot \varepsilon \cdot v_x \quad (15)$$

$$\frac{1}{g} b_y = 1 - \frac{\rho c_a}{2 G/F} \cdot v \cdot v_x - \frac{\rho c_a}{2 G/F} \cdot v \cdot \varepsilon \cdot v_y \quad (16)$$

In diesen beiden Gleichungen ist der Term $\frac{\rho c_a}{2 G/F}$ eine Konstante, da wir c_a als konstant vorausgesetzt haben, da ferner die Flächenbelastung G/F konstant ist, und wir die Luftdichte ρ ebenfalls als konstant annehmen wollen. Diese Konstante kann sehr anschaulich interpretiert werden. Hierzu bezeichnen wir

$$\frac{\rho c_a}{2 G/F} = \frac{1}{w^2} \quad (17)$$

und erhalten in Umkehrung

$$w = \sqrt{\frac{2 G/F}{\rho c_a}} \quad (18)$$

w hat die Dimension einer Geschwindigkeit und stellt die Geschwindigkeit dar, mit der das Modell ohne Störung der Bahn, d.h. im stationären Gleitflug, fliegen würde. Zu unserer Rechnung brauchen wir als Daten nur diese Geschwindigkeit und die zu dem gegebenen c_a gehörende inverse Gleitzahl ε des Modells.

Mit dieser Konstante und mit (13) erhalten wir

$$\frac{1}{g} b_x = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{w^2} (v_y - \varepsilon \cdot v_x) \quad (19)$$

$$\frac{1}{g} b_y = 1 - \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{w^2} (v_x + \varepsilon \cdot v_y) \quad (20)$$

Führen wir nun noch die Ableitungen nach der Zeit ein:

$$b_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} \quad (21) \quad b_y = \frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{y} \quad (22)$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (23) \quad v_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y} \quad (24)$$

so können wir die beiden Gleichungen schreiben als

$$\frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{w^2} (\dot{y} - \varepsilon \cdot \dot{x}) - \frac{1}{g} \ddot{x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{w^2} (\dot{x} + \varepsilon \cdot \dot{y}) + \frac{1}{g} \ddot{y} = 1 \quad (26)$$

Diese beiden gekoppelten, nichtlinearen Differentialgleichungen beschreiben die Bewegung des Modells, d.h. die Phygoide mit Luftwiderstand. Bei einmaliger Integration über die Zeit erhält man daraus die Geschwindigkeitskomponenten v_x und v_y , bei nochmaliger Integration dann die Bahnkomponenten x und y . Damit sind natürlich auch die Geschwindigkeit und die Bahn selbst bekannt.

Bevor wir an die Lösung der Gleichungen gehen, müssen wir in jedem Fall noch die Anfangsbedingungen vorgeben, d.h. Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit bzw. deren Komponenten. Wir geben damit gewissermaßen die Bahnstörung vor, und die Rechnung liefert die Reaktion des Modells darauf. Stattdessen können wir uns auch vorstellen, daß das Modell von einem auf der Spitze eines Turms angeordneten Katapult mit den vorgegebenen Werten von v_x und v_y "abgeschossen" wird.

Für die "Startposition" geben wir am einfachsten $x = 0$ und $y = 0$ vor, d.h. wir legen den Koordinatenursprung in den Startpunkt. Für die Geschwindigkeit ist es anschaulicher, anstelle von Komponenten den Betrag und die Richtung, d.h. den Bahnwinkel, vorzugeben. Bezeichnen wir die Anfangswerte mit dem Index "0", dann wird

$$v_{x0} = v_0 \cdot \cos \vartheta_0 \quad (27) \quad v_{y0} = v_0 \cdot \sin \vartheta_0 \quad (28)$$

Lösung der Bewegungsgleichungen

Die zweimalige Integration der Gleichungen (25) und (26) ist nun allerdings leichter gesagt als getan, denn es ist -zumindest gilt das für mich- keine allgemeine, geschlossene Lösung bekannt. In solchen Fällen greift der Praktiker dann zu numerischen Lösungsverfahren, von denen das "Runge-Kutta"-Verfahren wohl mit das bekannteste und gängigste ist. Dieser Lösungsweg wird weiter unten in Form eines PASCAL-Rechenprogramms mit graphischer Ausgabe gezeigt.

Ein anderer Weg zur Lösung besteht darin, den Bewegungsvorgang nachzubilden, ihn zu "simulieren". Früher verwendete man dazu Analogrechner; heute gibt es zu diesem Zweck spezielle Simulationsprogramme, die u.a. auch auf jedem besseren PC laufen. Nahezu ideal für unsere Zwecke der Modell-Flugmechanik sind Programme, wie sie zur Simulation von Regelkreisen, Prozeßsteuerungen u.dgl. in unterschiedlichster Form und Preislage angeboten werden.

Mit Hilfe eines solchen Programms (z.B. "Flowchart" oder "Flowlearn") kann man die Bewegungsverläufe mit vergleichsweise geringem Aufwand untersuchen. Nach Eingabe von Struktur des Problems, der Gleichungen, Daten und Anfangsbedingungen läuft dann auf Tastendruck der Vorgang in Echtzeit ab; das Modell "fliegt" gewissermaßen im Computer. Der Verlauf nahezu jeder interessierenden Größe, z. B. Flugbahn, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Winkel usw. kann in Form von Diagrammen verfolgt werden. Änderungen in den Daten zur Untersuchung von "was wäre, wenn..." sind einfach und schnell durchführbar.

Nachfolgend werden als Beispiel einer Simulation Ergebnisse für ein "08/15-Segelmodell" dargestellt. Die zugrundeliegenden Daten sind:

Flächenbelastung	$G/F = 50 \text{ N/m}^2$
Auftriebsbeiwert	$c_a = 0.6$ (gewählte Trimmung)
Gleitzahl	$E = 16$ (" ")
Luftdichte	$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$
Erdbeschleunigung	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Damit wird die mittlere Geschwindigkeit

$$w = \sqrt{\frac{2 G/F}{\rho c_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{1.22 \cdot 0.6}} = 11.7 \text{ [m/s]}$$

Der mittlere Gleitwinkel (Bahnwinkel) ist

$$\vartheta = \arctg\left(\frac{1}{E}\right) = \arctg\left(\frac{1}{16}\right) = 3.6^\circ$$

mit der inversen Gleitzahl

$$\varepsilon = \frac{1}{E} = \frac{1}{16} = 0.063$$

Als Anfangswerte sind angenommen:

$$v_0 = 5 \text{ [m/s]} \quad \vartheta_0 = 11^\circ$$

und daraus

$$v_{y0} = v_0 \cdot \sin \vartheta_0 = 5 \cdot \sin(11^\circ) = 0.95 \text{ [m/s]}$$

$$v_{x0} = v_0 \cdot \cos \vartheta_0 = 5 \cdot \cos(11^\circ) = 4.91 \text{ [m/s]}$$

Das Modell ist also zu Beginn zu langsam, und die Bahn ist zu steil.

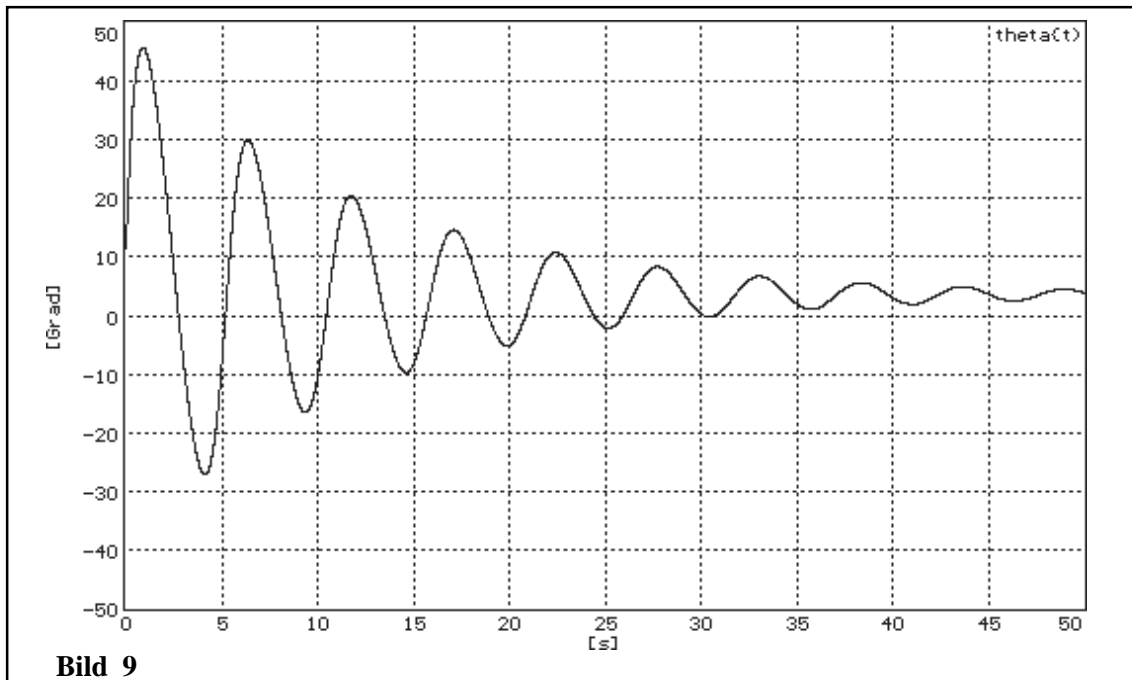


Bild 9

Bild 9 zeigt den Verlauf des Bahnwinkels. Dieser versteilert sich in den ersten 1.5 Sekunden auf 45° , wird dann wieder flacher und weist nach ca. 4 Sekunden unter 27° nach oben. Danach wiederholt sich das Spiel mit kleiner werdenden Amplituden. Nach 20 Sekunden und ca. 3.5 Schwingungen schwankt er immer noch um ca. $\pm 10^\circ$. Die Schwingungsdauer beträgt etwa 5.5 Sekunden.

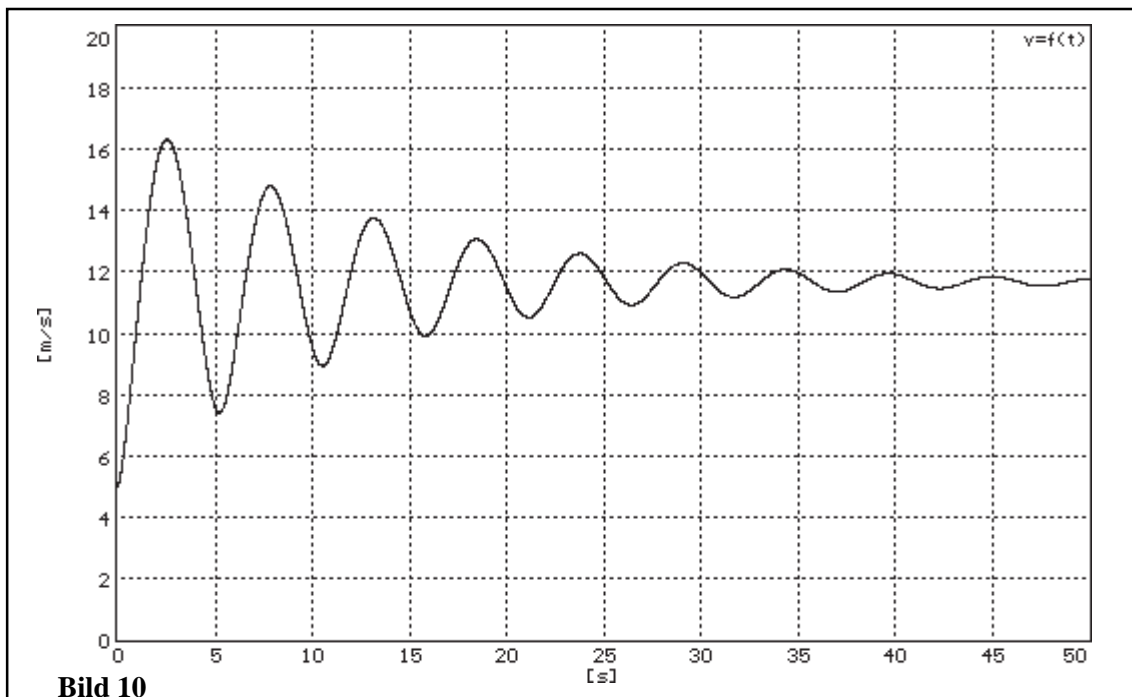


Bild 10

Bild 10 zeigt den Verlauf der Fluggeschwindigkeit. Das Modell wird zunächst schneller bis auf ca. 16.3 m/s nach ca. 2.5 sec bei $\vartheta = 0$ (vgl. Bild 9). Danach wird es mit ca. 5.5 sec Periodendauer langsamer und schneller. Nach 20 Sekunden beträgt die Schwankung immer noch ca. ± 1 m/s. Im Laufe der Zeit nähert sich die Geschwindigkeit dem schon bekannten Wert von 11.7 m/s im stationären Gleitflug.

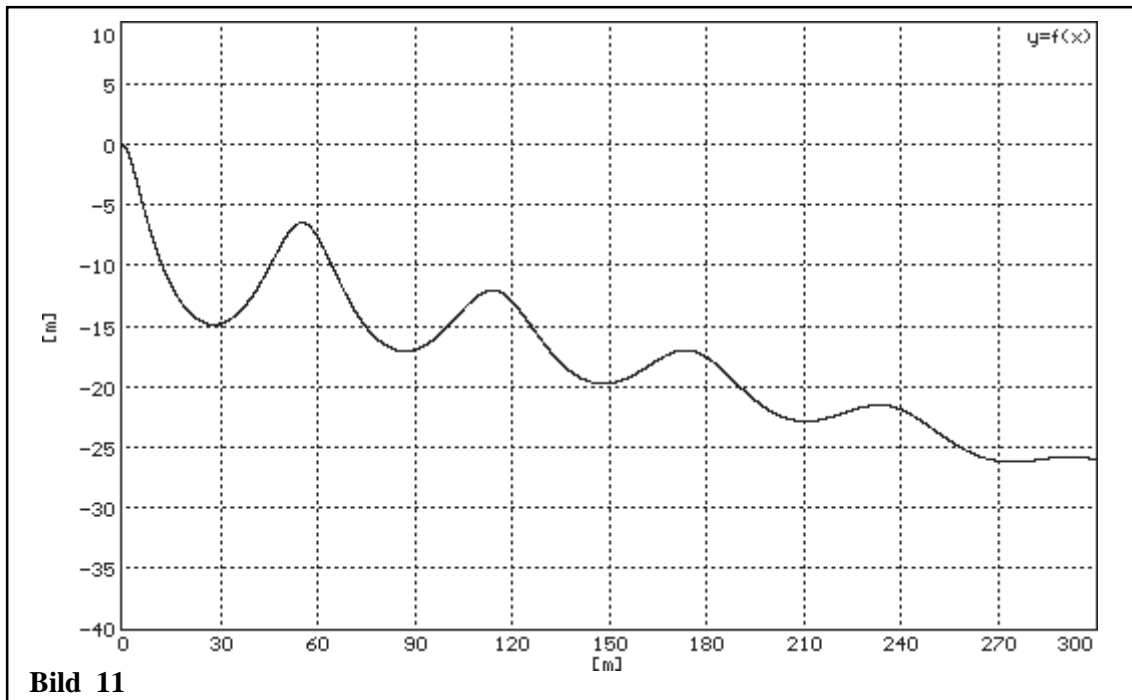
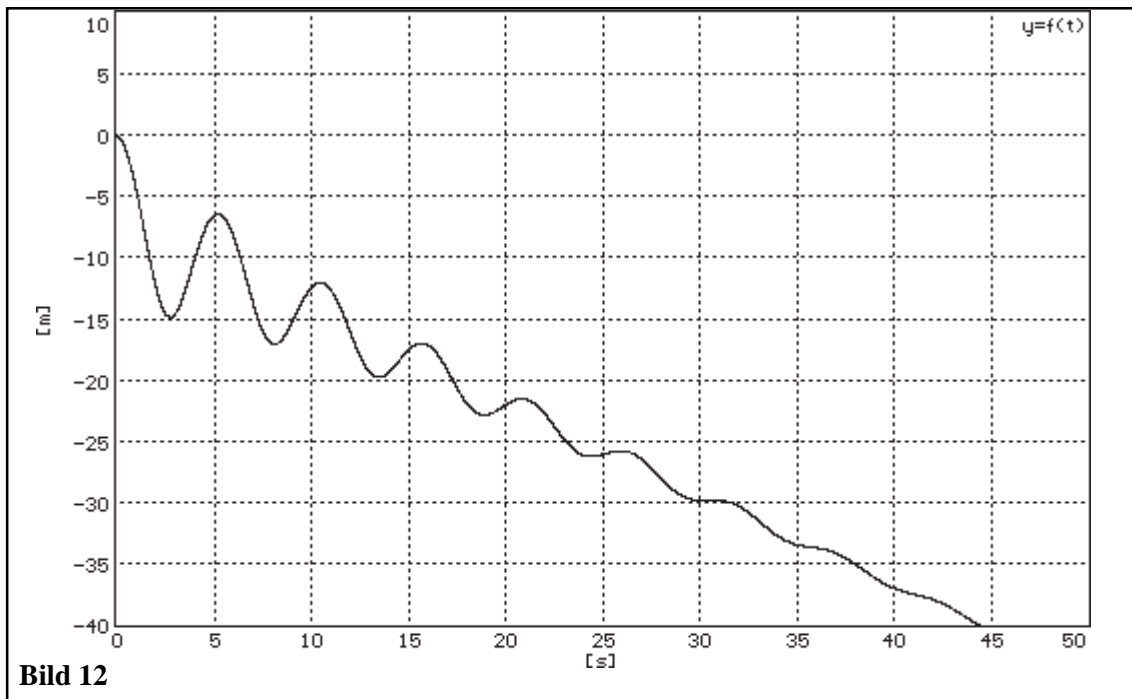


Bild 11 zeigt den Verlauf der Flugbahn. Nach einem ersten Sturzflug von ca. 15 Meter verringert sich allmählich die Amplitude; aus den anfänglichen "Girlanden" werden allmählich sanfte Schwingungen. Nach dem zweiten Wellental steigt das Modell aber doch nochmals rd. 6 Meter weg, um danach um ca. 8 Meter ins nächste "Tal" zu fallen. Die Wellenlänge beträgt ca. 60 Meter. Durch die unterschiedlichen Maßstäbe erscheint die Kurve überhöht.



In Bild 12 ist der Höhenverlauf über der Zeit dargestellt. Dieses Bild ist also das theoretische Gegenstück zum Bild 1, welches aus der Realität stammt. Wegen etwas unterschiedlicher Daten sind natürlich die Schwingungsdauer und der mittlere Sinkgeschwindigkeit nicht exakt gleich, aber die Ähnlichkeit ist trotzdem deutlich zu erkennen.

Der Leistungsverlust durch die Phygoide

Wir wollen nun abschätzen, was uns die Phygoide an “Flugleistung” kostet. Dabei ist “Flugleistung” bewußt in Anführungszeichen gesetzt, denn je nach Umständen des Einzelfalls können die relevanten Akzente ganz unterschiedlich liegen. Beim Thermiksegeln z.B. interessiert wohl vor allem, wie sich die mittlere Sinkgeschwindigkeit verschlechtert, bzw. wie groß der zusätzliche Höhenverlust ist. Steigt andererseits infolge der Phygoide ein F3B-Modell im Speedflug um einige Meter weg, so kostet dies infolge des Fahrtverlustes entscheidende Sekunden; alles andere ist jedoch uninteressant. Wieder andere Überlegungen könnte man z.B. zum Steigflug von Elektromodellen anstellen.

Damit der gegebene Rahmen nicht gesprengt wird, wollen wir uns nicht mit solchen “sekundären” Verlusten beschäftigen und uns wieder auf den einfachen Gleitflug beschränken; ferner wollen wir die “harmlose” Form der Phygoide nach Bild 7a annehmen. In diesem Fall läßt sich die Frage näherungsweise durch eine Energiebetrachtung beantworten.

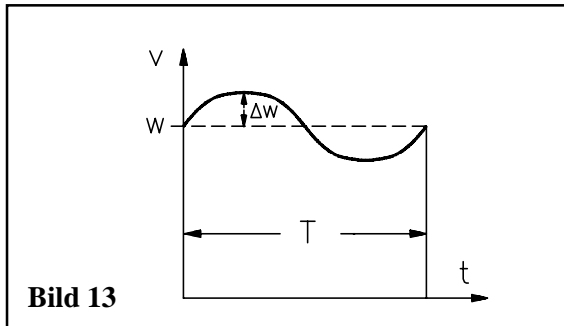


Bild 13

Wie wir wissen, ist c_a konstant, und damit auch c_w . Die Geschwindigkeit schwankt periodisch um einen mittleren Wert w , der gleich der “ungestörten” Gleitfluggeschwindigkeit ist; vgl. Bild 13.

Wir nehmen an, daß die Schwankung näherungsweise sinusförmig verläuft; dann ist die gesamte Geschwindigkeit

$$v = w + \Delta w \cdot \sin(\omega t) \quad (29)$$

bzw.

$$v = w + \Delta w \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (30)$$

Hierin ist Δw die Amplitude der Schwankung und T deren Schwingungszeit.

Der Widerstand beträgt
$$W = \frac{\rho}{2} v^2 F c_w \quad (31)$$

und die vom Modell zu leistende Widerstandsleistung (Bild 14) damit

$$P = v \cdot W = \frac{\rho}{2} v^3 F c_w \quad (32)$$

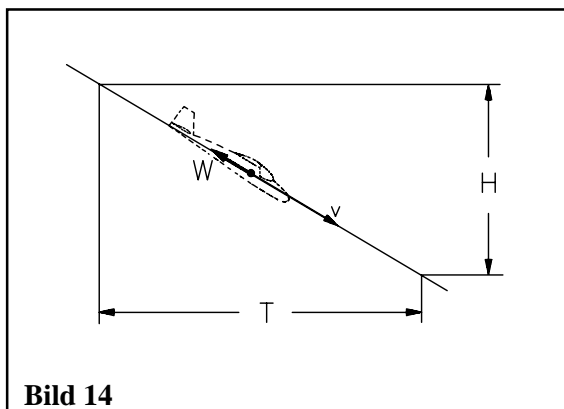


Bild 14

Fliegt das Modell ungestört auf einer geraden Bahn, dann können wir statt v unser w einsetzen:

$$P_{\text{ung}} = w \cdot W = \frac{\rho}{2} w^3 F c_w \quad (33)$$

Betrachten wir einen Zeitabschnitt ebenfalls von der Dauer T , dann ist der Energieverlust des Modells

$$E_{\text{ung}} = \frac{\rho}{2} w^3 F c_w \cdot T = G \cdot H \quad (34)$$

Dieser ist ferner gleich dem Gewicht multipliziert mit dem Höhenverlust H während dieser Zeit.

$$P_{gst} = \frac{\rho}{2} \left(w + \Delta w \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right)^3 F \quad (35)$$

Im Fall der gestörten Bahn ist dagegen

$$E_{gst} = \frac{\rho}{2} F c_w \int_0^T \left(w + \Delta w \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right)^3 dt \quad (36)$$

und den Energieverlust müssen wir jetzt durch Integration von P über die Zeit T berechnen:

$$E_{gst} = \frac{\rho}{2} F c_w w \left(w^2 + \frac{3}{2} \Delta w^2 \right) T \quad (37)$$

Die nicht schwierige, aber etwas längliche Berechnung des Integrals sei hier übergangen und nur das Ergebnis angegeben; es wird

$$\frac{E_{gst}}{E_{ung}} = \frac{\frac{\rho}{2} F c_w w \left(w^2 + \frac{3}{2} \Delta w^2 \right) T}{\frac{\rho}{2} w^3 F c_w \cdot T} = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2 \quad (38)$$

Bilden wir nun das Verhältnis der beiden Energieverluste, so wird

$$\frac{\Delta E_{gst}}{E_{ung}} = \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2 \quad (39)$$

bzw., wenn wir nur die zusätzlich zum ungestörten Fall aufzubringende Energie ΔE betrachten

$$\frac{\Delta E_{gst}}{E_{ung}} = \frac{3}{2} 0.1^2 = 0.015 = 1.5 \%$$

Der zusätzliche Höhenverlust ist natürlich proportional dem zusätzlichen Energieverlust. Was dies nun in der Praxis bedeutet, sehen wir anschaulich, indem wir in (39) typische Werte aus der Praxis einsetzen. Aus telemetrisch aufgezeichneten Flügen ist bekannt, daß die Schwankung Δw maximal etwa 20%, in den meisten Fällen etwa 10% der mittleren Geschwindigkeit w beträgt. Setzen wir 10% = 0.1 in (39) ein, erhalten wir und entsprechend auch

$$\frac{\Delta H_{gst}}{H_{ung}} = 1.5 \%$$

Dieser für Viele sicher unerwartet niedrige Wert ist in der Praxis kaum von Bedeutung.

Wenn wir von 20% Geschwindigkeitsschwankung ausgehen, beträgt der zusätzliche Höhenverlust 6%. Das kann man zwar nicht mehr vernachlässigen; dafür tritt dieser Fall seltener auf. Im Mittel über einen gesamten Flug verteilt wird mit etwa 2-3% zusätzlichem Höhenverlust durch Phygoidenschwingungen zu rechnen sein.

Wenn wir uns nachfolgend damit befassen, was wir gegen die Phygoide unternehmen können, so geschieht dies also nicht mit dem Hauptziel, primär die *Flugleistungen* zu erhöhen. Vielmehr ist das Ziel, die *Flugeigenschaften* zu verbessern.

Damit verbessern sich indirekt aber auch die Flugleistungen, indem wie im o.g. Beispiel beim F3B-Speedflug das Modell nicht mehr so leicht wegsteigt, indem z.B. im F-Schlepp das Modell ruhiger liegt, oder indem ganz allgemein der Pilot von eigentlich unnötigen Steuerbefehlen entlastet wird.

Unterdrückung der Phygoide

Nachdem wir die Eigenschaften der Phygoidenbewegung ausgiebig kennengelernt haben, soll uns jetzt die Frage beschäftigen, was man dagegen unternehmen kann. Zumindest nach Wissen des Verfassers ist bis jetzt noch kein *einfaches* “Gegenmittel” bekannt. Selbstverständlich müssen wir Flugzeuge z.B. der Verkehrs- und militärischen Luftfahrt von dieser Behauptung ausnehmen, denn in diesen sorgen aufwendige Flugregler dafür, daß nicht nur die Phygoide, sondern auch diverse andere unerwünschte Bewegungen unterdrückt werden. Bei kleineren manntragenden Flugzeugen “lebt man” in der Regel mit ihr. Dies ist jedoch wesentlich einfacher als im Modellflug, da zum einen die Schwingungsdauern größer sind und damit das “Wegsteuern” leichter ist. Ferner fliegen diese Flugzeuge einen viel größeren Teil der gesamten Flugzeit geradeaus, während im Modellflug durch die unvermeidlichen und wechselnden Kurven quasi ständig Phygoiden angeregt werden.

Überlegen wir, was man gegen die Phygoide tun könnte, so haben wir ein großes Problem. Das klassische Mittel zum Erzielen akzeptabler Flugeigenschaften, nämlich “Formgebung” im weitesten Sinn, versagt hier fast völlig. Keine besonderen Profilformen, keine Schränkung, Pfeilung, Leitwerksinhalte und -formen nützen etwas. Auch kein noch so großes Höhenleitwerk kann gegen die Phygoide helfen, denn dieses könnte letztlich nur den Anstellwinkel des Flügels noch genauer einstellen (und daneben noch größere Drehdämpfung der Anstellwinkelschwingung bewirken) und damit das c_a noch konstanter halten, als es ohnehin schon ist. Es bleiben nur zwei Wege übrig:

Zum Ersten

Daß wir die aerodynamische Qualität (c_w) generell schlechter machen, steht außerhalb jeder Diskussion. Man könnte aber versuchen, der Schwingung zeitweise mehr Energie zu entziehen, als dies durch den “normalen” Luftwiderstand der Fall ist. Beispielsweise könnte man automatisch kurzzeitig Störklappen o.ä. ausfahren, sobald das Modell innerhalb der Schwingung schneller wird. Abgesehen davon, daß derartige Widerstandserzeuger konstruktiv nicht immer möglich und auch nicht ganz einfach realisierbar sind, würden auch durch den so erzeugten zeitweisen Zusatzwiderstand die Flugleistungen erheblich leiden.

Daß diese Methode aber nicht unter allen Umständen total abwegig ist, zeigt die Praxis mancher Modellpiloten beim F-Schlepp. Die fahren nämlich beim Segelmodell die Störklappen teilweise oder sogar ganz aus. Auf die Frage, wozu dies gut sein soll, erhält man die Antwort “so fliegt das Modell ruhiger”. Wissen Sie jetzt, warum ?

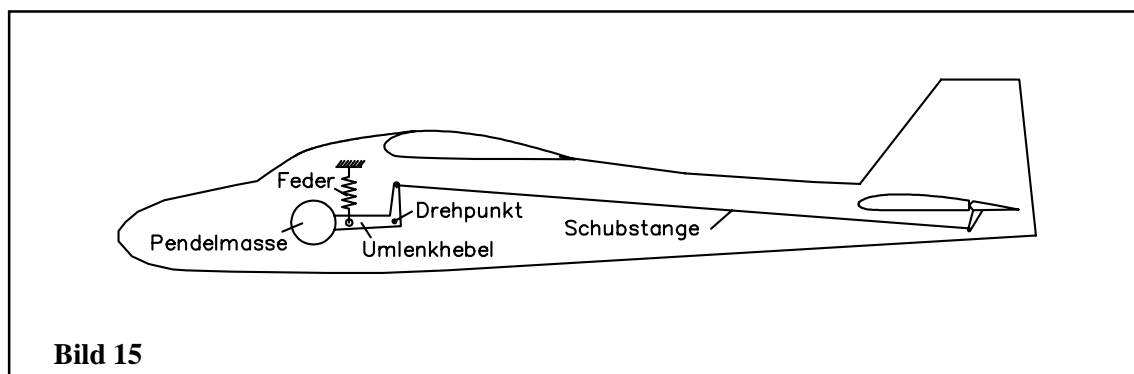
Zum Zweiten

Wir könnten versuchen, das zu automatisieren, was fortgeschrittene Modellpiloten in der Praxis machen- nämlich im richtigen Moment etwas drücken oder ziehen. Wir müssten

einen “Autopilot” oder “Mini-Flugregler” im Modell installieren, der z.B. etwas Tiefenruder gibt, wenn das Modell in der Phygoide wegsteigen will. Oder umgekehrt, der etwas zieht, wenn die Phygoidenbahn nach unten geht. Übrigens- jeder Vogel beherrscht diesen “Regelvorgang”. .

Ein früher Vorschlag

Daß sich Modellbauer hierzu schon früher Gedanken gemacht haben, zeigt ein Vorschlag für eine rein mechanisch arbeitenden Vorrichtung [5] aus dem Jahr 1956 (Bild 15). Hier sollte ein waagrecht liegendes und gewichtskompensiertes Pendel über eine Schubstange



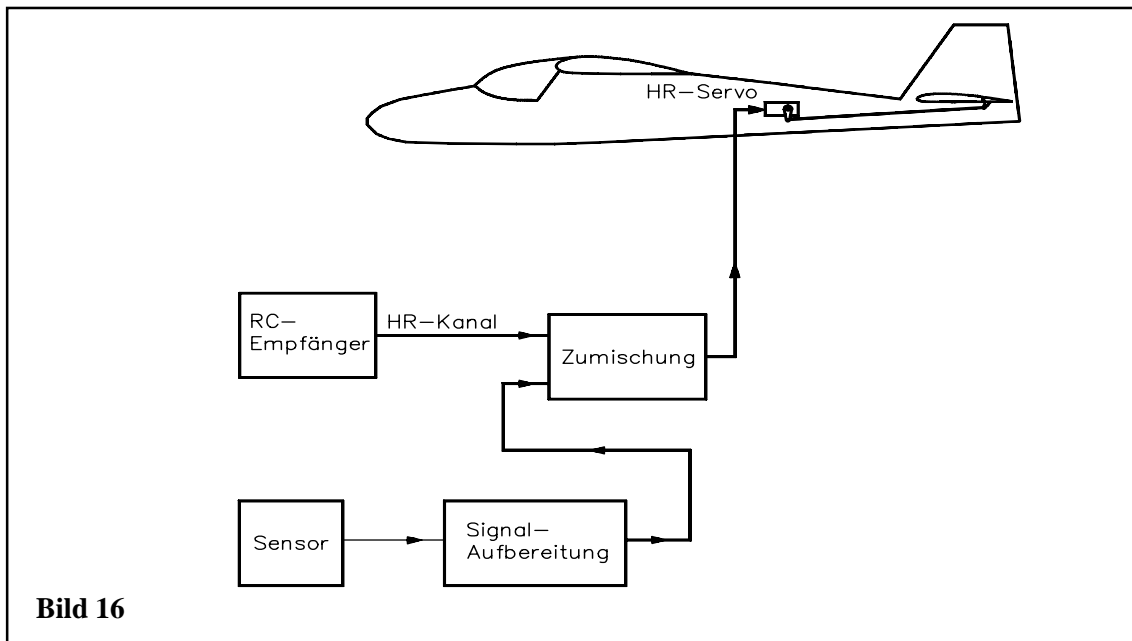
das Höhenruder verstellen. Will das Modell z.B. nach oben steigen, so bleibt die Pendelmasse relativ zum Rest des Modells zurück und verstellt damit das Höhenruder im Sinne von “Drücken”.

Selbst wenn wir einmal von Gewicht, Platzbedarf und diversen mechanischen Problemen absehen, so dürfte diese Einrichtung kaum funktioniert haben. Auch ohne auf die regelungstechnisch nicht ganz einfache Wirkungsweise einzugehen, können wir schon sagen, daß das Modell wahrscheinlich spätestens in der ersten Kurve abgestürzt wäre. Unter Wirkung des erhöhten Andrucks in der Kurve hätte das Pendel das Höhenruder ebenfalls auf “Drücken” verstellt -genau das Gegenteil von dem, was praktisch erforderlich ist.

Die moderne Lösung

Nun bietet uns die heutige Modelltechnik weitaus bessere Möglichkeiten. Einen wesentlichen Teil des Autopiloten -nämlich den “Aktuator”, “Steller”, oder wie auch immer wir es nennen wollen- haben wir in Form des Höhenruderservos in der Regel schon eingebaut. Zu dessen zusätzlicher Ansteuerung neben seiner normalen Steuerfunktion bietet uns die Elektronik vielfältige Möglichkeiten.

Eine kompletter “Mini-Flugregler” würde im vereinfachten Blockschaltbild etwa aussehen wie in Bild 16 gezeigt. Am Anfang steht ein Sensor für die Bewegungsgröße, von der das Stellsignal abgeleitet wird; hierauf kommen wir weiter unten noch zu sprechen. Das elektrische Ausgangssignal des Sensors wird in der Elektronik aufbereitet und in geeigneter Form dem normalen, vom RC-Empfänger kommenden Signal für das Höhenruderservo zugemischt. Im Detail brauchen wir uns hier mit der Elektronik nicht weiter zu beschäftigen, denn ähnliche, vergleichbare Schaltungen sind bekannt und weit verbreitet, z.B. in den Kreisläufen, wie sie in Modellhubschraubern eingesetzt werden.



Höhenrudersteuerung- ein Widerspruch?

Bevor wir auf den Knackpunkt -nämlich den Sensor- zu sprechen kommen, ist noch etwas zur Höhenrudersteuerung allgemein zu sagen. Jede Verstellung des Höhenruders bedeutet letztlich eine Verstellung des Auftriebsbeiwerts; man könnte sagen, über den “Umweg” eines veränderten Längsmomenten-Gleichgewichts. Zu jeder Höhenruderstellung gehört ein ganz bestimmter c_a -Wert. Komplizierter wird es, wenn wir noch andere relevante Einflußgrößen wie Schwerpunktlage, Wölbklappenstellung u.ä. berücksichtigen; im Prinzip bleibt der Zusammenhang jedoch gleich.

Etwas vereinfacht gesagt: Höhenruderverstellung bedeutet c_a -Verstellung.

Man könnte nun einwenden, daß wir damit unsere Voraussetzung eines konstanten c_a verlassen und die gesamte Theorie hinfällig wird. Glücklicherweise trifft dies aber nicht zu. Zum einen brauchen wir nämlich nur geringe Höhenruderausschläge, um die Phygoide wegzusteuern; der c_a -Wert ändert sich durch die entsprechenden Korrekturen nur um wenige Prozent. Zum anderen würden sich selbst bei einer größeren c_a -Veränderung im Verlauf der Bewegung nur Schwingungsdauer, mittlere Bahngeschwindigkeit und mittlerer Bahnwinkel etwas verändern. Die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge bleiben jedoch gleich. Erst bei einer starken “Aufschaltung”, d.h. sehr großen von der Stabilisierungseinrichtung erzeugten Ruderausschlägen, würden neue Effekte auftreten.

Die “formale” Aufschaltung

Für unsere weiteren Überlegungen und Rechnungen können wir nun die Stabilisierungseinrichtung sehr einfach formelmäßig beschreiben; es ist

$$c_a = c_{a0} + \Delta c_a \quad (40)$$

mit

$$\Delta c_a = k \cdot \Delta X \quad (41)$$

Hierin sind:

- c_a : Das gesamte, von Trimmung und Stabilisierungseinrichtung herrührende c_a
- c_{a0} : Unser seitheriges, die Phygoide charakterisierendes c_a (z.B. in Formel (18)), das jetzt zum “mittleren” c_a wird;
- Δc_a : Die von der Stabilisierungseinrichtung erzeugte zusätzliche c_a -Verstellung;
- ΔX : Die Abweichung vom Normalwert derjenigen Bewegungsgröße, von der wir die Stabilisierung ableiten wollen (s.u.). **Sie wird "Aufschaltgröße" genannt.**
- k: Ein passend zu wählender Proportionalitätsfaktor, der alle vorkommenden Proportionalitätsfaktoren beinhaltet (z.B. Sensorempfindlichkeit, Verstärkung der Elektronik, Servoausschlag, Rudergröße usw.)

k nennt man den “Aufschaltfaktor”

Die Aufschaltgröße

Nun ist es höchste Zeit, endlich zum Knackpunkt der Sache zu kommen; nämlich der *Aufschaltgröße*, von der wir die Korrektursignale ableiten wollen. Ohne genauer hinzusehen, kommt für's erste eine Vielzahl von Größen dafür infrage. Alles, was sich während der Phygoidenbewegung ändert, ist zunächst mal Kandidat: Bahnwinkel, Fluggeschwindigkeit, Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit, Höhe, Nickgeschwindigkeit, und zum Teil auch die zeitlichen Ableitungen dieser Größen. Um die Sache noch komplizierter (aber vielleicht auch wirkungsvoller) zu machen, könnten wir auch mehrere dieser Größen “mischen” und aufschalten.

Bei näherem Überlegen können wir einige hiervon allerdings schnell wieder ausscheiden: So dürfte es z.B. schwierig sein, den Bahnwinkel mit geringem Aufwand zuverlässig zu messen. Aufschaltung der Höhe ist nicht sinnvoll, denn diese ändert sich auch ohne Phygoide ständig. Die Höhenänderung (= Steigen/Fallen) verspricht da schon eher Erfolg; aber wie sollte unsere Einrichtung zwischen unerwünschter (Phygoide) und erwünschter (Aufwinde) Vertikalgeschwindigkeit unterscheiden? Ein auf die Vertikalbeschleunigung reagierender Sensor bekommt u.a. im Kurvenflug Probleme (s.o.).

Als aussichtsreiche Kandidaten bleiben vor allem Fluggeschwindigkeit, Nickgeschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Nickbeschleunigung übrig. Wer etwas Erfahrung in Regelungstechnik hat, tippt vielleicht auf eine der Beschleunigungen. Vorteilhaft wäre in diesem Fall auch, daß -mit Ausnahme der Erdbeschleunigung- alle Beschleunigungen im ungestörten, gleichförmigen Flug gleich Null sind, was u.a. die gerätetechnische Ausführung der Einrichtung vereinfachen würde.

Nun könnten wir im weiteren rein experimentell vorgehen; hierzu müssten wir die entsprechenden Sensoren samt Elektronik kaufen bzw. bauen und anschließend im Modell erproben. Das wäre einem versierten Bastler wohl ohne größere Probleme möglich, würde aber erhebliche Zeit kosten; vor allem dann, wenn alle Varianten untersucht werden sollen. Neben dem Bau wären auch zahlreiche Versuchsflüge notwendig.

Viel schneller und mit weniger Aufwand geht es, wenn wir “halbtheoretisch” vorgehen und wieder zum Hilfsmittel der Simulation bzw. dem “Phygoidenprogramm” (das ebenfalls eine Simulation darstellt) greifen. Die Aufschaltung von einer unserer o.g. Größen ist in beiden Fällen schnell gemacht, danach kann man das Ergebnis unmittelbar und ohne Risiko ansehen. Gegebenenfalls können Aufschaltgröße und Aufschaltfaktor leicht geändert werden.

Dabei zeigt sich nun u.a., daß z.B. eine Aufschaltung der Fluggeschwindigkeit chancenlos ist. Ursache ist die Phasenverschiebung zwischen Ort (Bahnpunkt) und Geschwindigkeit. Zu dem Zeitpunkt, in welchem diese Aufschaltung “gegensteuert”, ist es hierzu bereits viel zu spät.

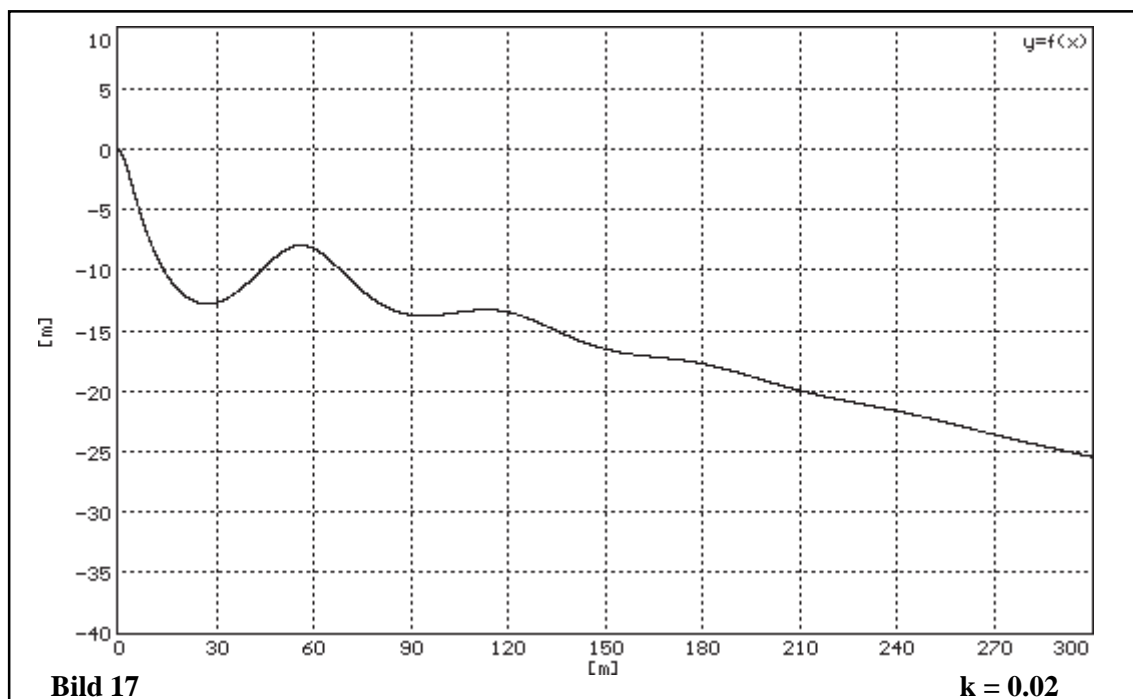
Dagegen zeigt sich die Längsbeschleunigung als ausgesprochener Favorit.

Ihre Aufschaltung bewirkt, daß jede Geschwindigkeitsänderung des Modells schon “im Ansatz” erkannt wird. Die Automatik hält z.B. einem Schnellerwerden gegen, indem etwas “gezogen” wird; wird das Modell langsamer, so drückt der Regler etwas nach.

Die Parallele zum “menschlichen Regler” liegt nahe: Ein erfahrener Pilot erkennt jede Bewegung des Modells bereits im Ansatz, bzw. er kennt sie sogar aus Erfahrung schon im voraus. Der unerfahrene Pilot dagegen reagiert dann, wenn er die Störung sieht oder fühlt, und dann ist es bereits zu spät. Kommt noch eine “lange Leitung” (Reaktionszeit) dazu, dann entstehen so die sog. “Piloten-induzierten-Schwingungen” (PIO), die bis zum Absturz führen können.

Beispiele

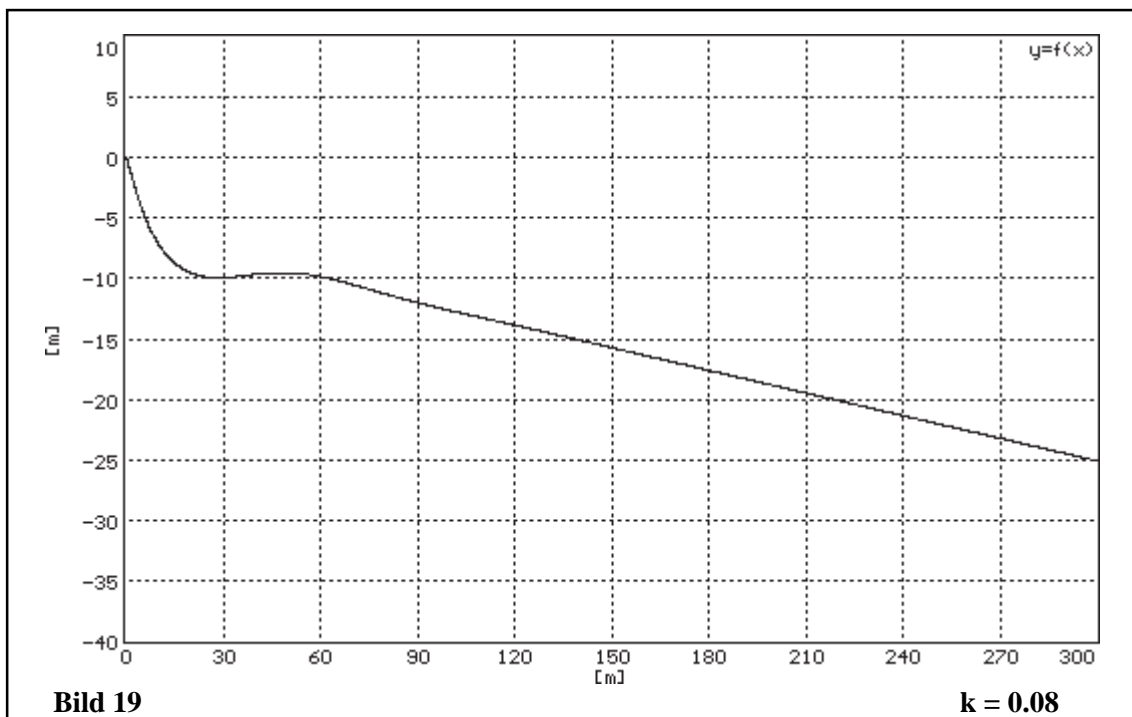
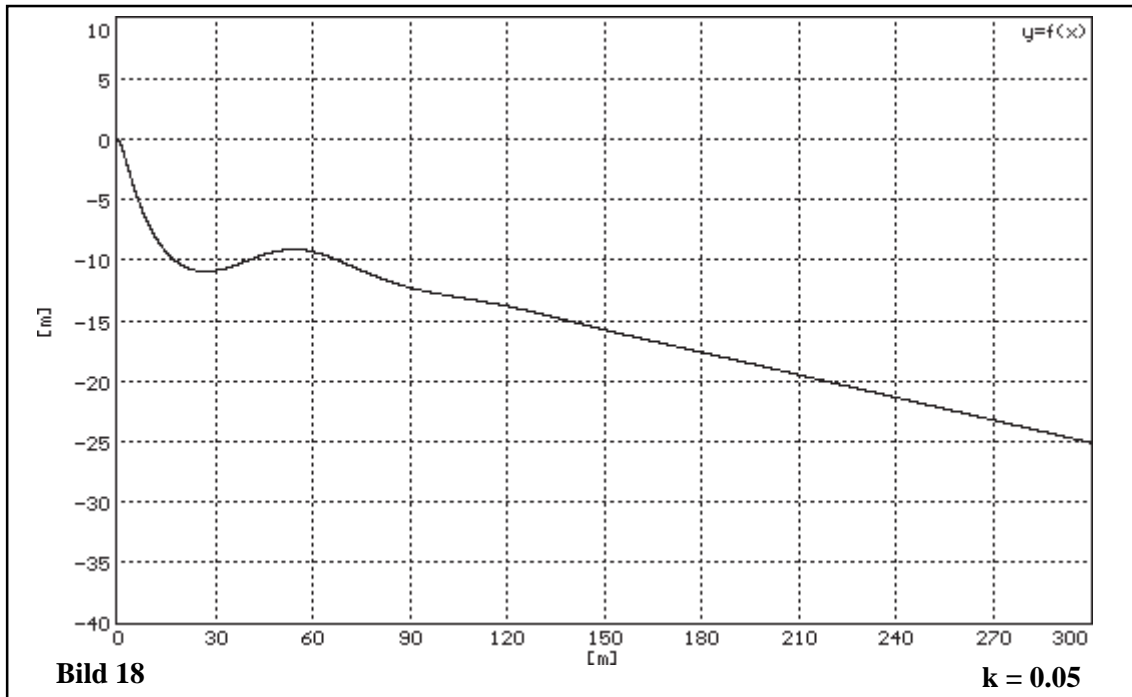
Bevor wir auf Details dieser Aufschaltung zu sprechen kommen, sollen zunächst einige Ergebnisse der Simulation vorgestellt werden. Hierbei sind das gleiche Modell und dieselben Anfangsbedingungen zugrundegelegt wie in dem in Bild 9 - 12 gezeigten Beispiel. Der einzige Unterschied besteht darin, daß nunmehr die Längsbeschleunigung



dv/dt auf c_a aufgeschaltet ist. Bild 17 - 19 zeigen anschaulich den Einfluß auf die Flugbahn für Aufschaltfaktoren von 0.02, 0.05 und 0.08. Sie entsprechen Bild 11 im "ungeregelten" Fall.

Zur Erinnerung: Ein Aufschaltfaktor von 0.05 bedeutet z.B., daß bei einer Längsbeschleunigung von 2 m/s^2 (ca. $0.2g$) ein Δc_a von $0.05 \cdot 2 = 0.1$ bewirkt wird.

Bei einem Aufschaltfaktor von 0.02 (Bild 17) hat sich schon einiges getan: Die anfängliche "Girlande" ist weg, und die Schwingung ist nach dem zweiten Berg schon weitgehend verschwunden. Ab etwa 200 m horizontaler Entfernung erfolgt ein gleichförmiger Gleitflug.



In Bild 18 ist der Aufschaltungsfaktor auf 0.05 vergrößert. Das Ergebnis ist ein nahezu ideales Stabilitätsverhalten: Nach dem anfänglichen, zur Fahraufnahme unvermeidlichen Sturzflug fängt das Modell ab und schießt nur noch einmal um ca. 2.5 m nach oben, um dann in den gleichförmigen Gleitflug überzugehen. Würde sich dieses Verhalten auch in der Realität einstellen- wir wären wohl hochzufrieden. Wie die Realität mit einem normalen Modell *ohne* Regler aussieht, dürfte wohl jedem Modellflieger bekannt sein.

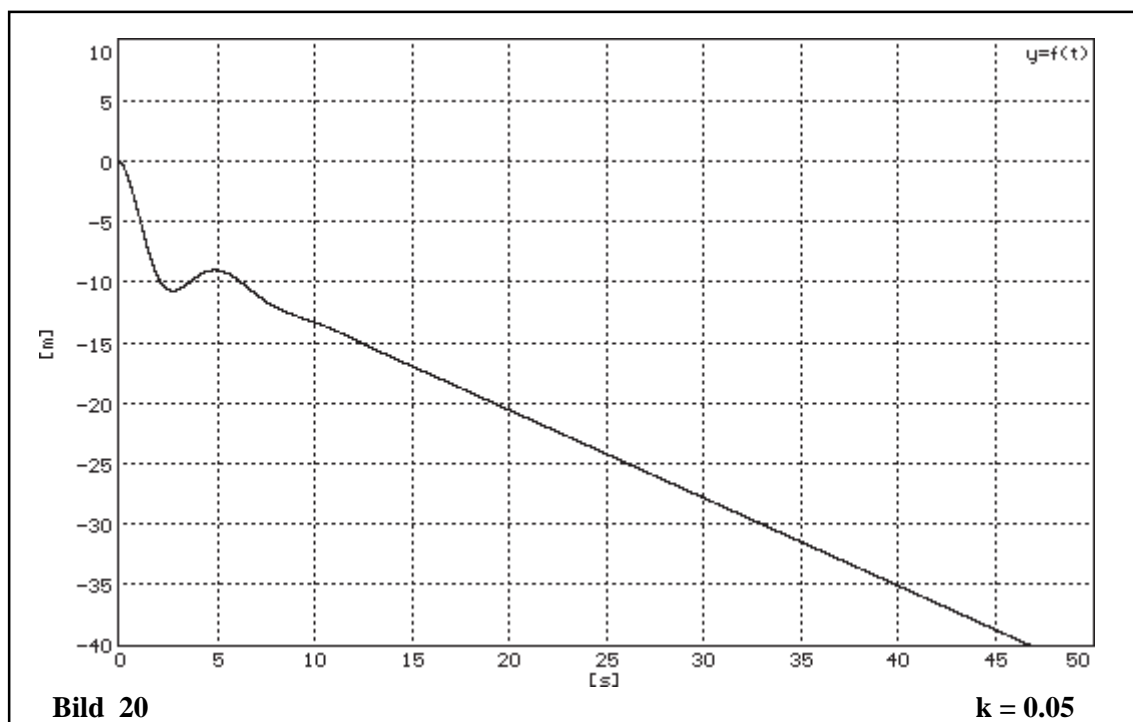
Bild 19 schließlich zeigt das Verhalten bei einem auf 0.08 nochmals vergrößerten Aufschaltfaktor. Es wird praktisch der Idealfall erreicht; die Schwingung ist verschwunden. Es sind jedoch Bedenken angebracht, ob sich dieses Simulationsergebnis in der Praxis bewahrheiten wird. Bei dieser schon recht starken Aufschaltung ist das Δc_a nicht mehr klein im Vergleich zum c_{a0} , und die Voraussetzungen unserer Theorie sind nur noch "bedingt" erfüllt. Es könnte auch sein, daß nun andere unliebsame "Nebenwirkungen" auftreten.

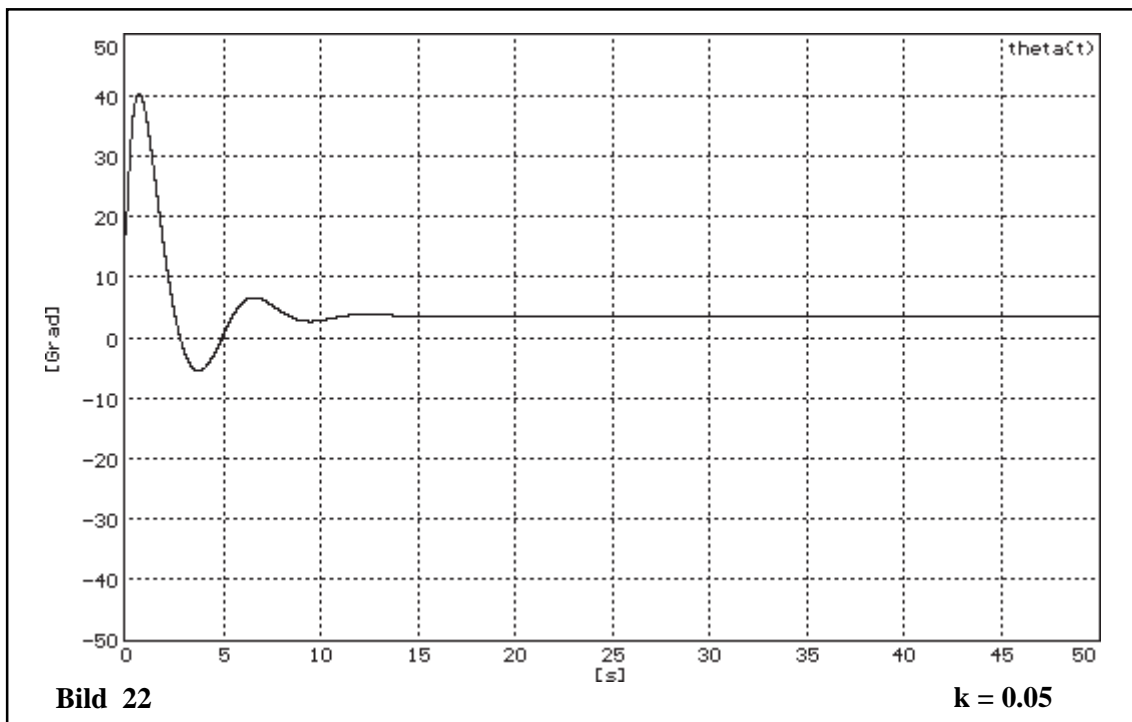
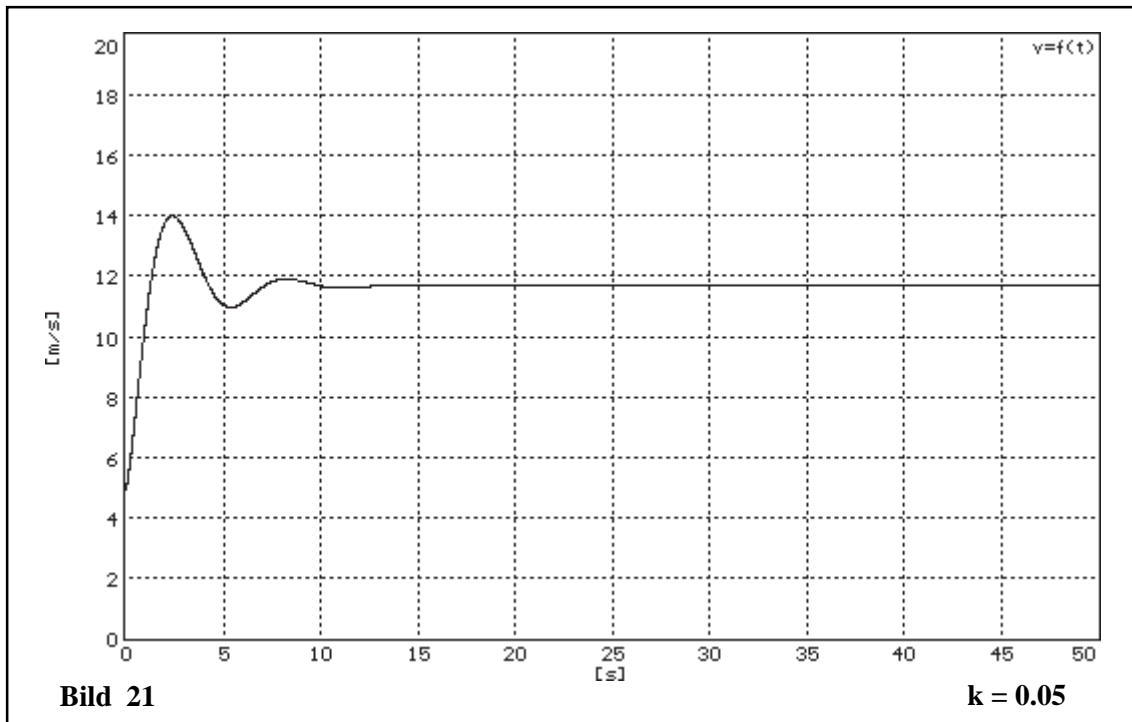
Wir wollen uns nun noch den Verlauf von Höhe, Geschwindigkeit und Bahnwinkel über der Zeit ansehen, allerdings beschränkt auf den Fall $k = 0.05$, damit die Diagramme nicht überhand nehmen.

Bild 20 (Höhe über der Zeit) bestätigt, was wir schon aus Bild 18 wissen. Wir können aber erkennen, daß bereits nach ca. 6 Sekunden der gleichförmige Gleitflug erreicht wird; im Gegensatz zu Bild 12, wo das Modell nach 25 Sekunden noch deutlich schwingt.

Bild 21 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit. Nach ca. 2 Sekunden hat das Modell mit rd. 14 m/s einen Fahrtüberschuß von stark 2 m/s, wird nach ca. 6 Sekunden mit 11 m/s wieder etwas zu langsam, um sich dann aber praktisch vollends auf den Sollwert einzustellen.

Der Verlauf des Bahnwinkels ist in Bild 22 dargestellt und vervollständigt den Überblick.





Die “bereinigte” Längsbeschleunigung

Nun sieht zwar alles recht gut aus, aber wir müssen uns doch nochmals mit der Aufschaltung im Detail beschäftigen. Eigentlich wäre es naheliegend, einfach einen Beschleunigungssensor im Modell vorzusehen und so einzubauen, daß seine empfindliche Achse in Längsrichtung liegt. Dies wäre auch deshalb wünschenswert, weil Sensoren für die Beschleunigung weit verbreitet und relativ billig sind; notfalls könnte ein solcher sogar selbstgebaut werden.

Um den Rest der Elektronik wollen wir uns an dieser Stelle nicht kümmern, da sie keine Besonderheit darstellt.

Die Sache hat jedoch noch einen Haken. Ein solcher Sensor würde nicht nur die von der Geschwindigkeitsänderung herrührende Beschleunigung messen, sondern auch die in Längsrichtung des Modells fallende Komponente $g_l = g \cdot \sin \vartheta$ der Erdbeschleunigung (Bild 23).

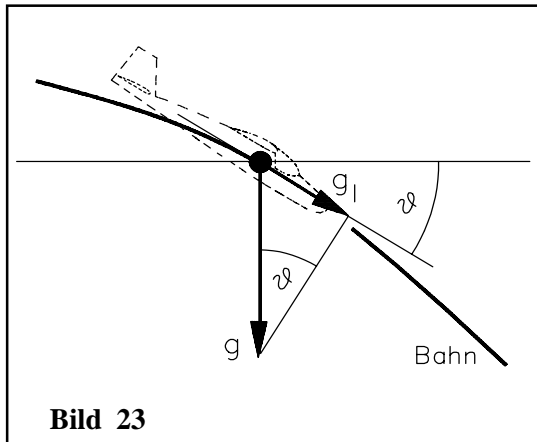


Bild 23

Dies macht leider das einfache Konzept zu nichts, denn bei der Definition unserer Aufschaltgröße hatten wir nur dv/dt , d.h. die Geschwindigkeitsänderung, zugrundegelegt. Diese reine Geschwindigkeitsänderung würde der Beschleunigungssensor nur im Sonderfall des exakten Horizontalflugs messen. Dagegen würde er auch ein Signal erzeugen, wenn das Modell mit konstanter Geschwindigkeit aufwärts oder abwärts fliegt (oder im Extremfall in Ruhe ist).

Wir würden unserem Höhenruder letztlich eine Mischung von Sinus des Bahnwinkels (ϑ)- und Geschwindigkeitsänderungs (dv/dt)-Anteil aufschalten. Beide Anteile sind von gleicher Größenordnung, und beide können das Vorzeichen wechseln. Selbstverständlich kann man auch das wieder in der Simulation untersuchen; leider ist das Ergebnis negativ.

Wir müssen uns also etwas anderes einfallen lassen, und das ist zum Glück auch nicht allzu schwierig. **Messen wir die Fluggeschwindigkeit und differenzieren den Messwert (elektronisch) nach der Zeit, so haben wir damit das dv/dt "in Reinkultur".**

Anstatt eines Beschleunigungssensors brauchen wir nun einen Fahrtmesser, was erheblichen Mehraufwand bedeutet; zumindest wenn dieser nach "klassischen" Verfahren arbeitet. Da-gegen ist das elektronische Differenzieren kaum ein Problem und erfordert nur minimalen Mehraufwand.

Der Fahrtmesser

Durch die Differenzierung erhalten wir andererseits aber auch einen großen Vorteil. Beim Differenzieren werden definitionsgemäß nur *Änderungen* ausgewertet und weiterverarbeitet, alle konstanten Anteile -also die Geschwindigkeit selbst- fallen automatisch unter den Tisch. Dies bedeutet, daß der Fahrtmesser "ungenau" sein darf, ja sogar nicht einmal kalibriert sein muß. Er muß im wesentlichen lediglich die Grundforderung erfüllen, daß er über den gesamten Geschwindigkeitsbereich des Modells einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Messwert hat, und dass die Kennlinie monoton verläuft, d.h. nirgendwo einen "rückläufigen" Teil aufweist. Diese Anforderung ist sogut wie immer erfüllt. Falls erwünscht, könnten wir den Fahrtmesser auch zeitweise einfach abschalten, ohne daß etwas passiert. Die Differenzierstufe gibt dann das Signal "Null" ab, und das Modell fliegt ohne Regler.

Sollte das Modell schon einen Fahrtmesser besitzen -was in Zeiten aufkommender Telemetrie nicht mehr so ganz abwegig ist- kann man natürlich diesen "anzapfen". Der

gesamte Zusatzaufwand zur Unterdrückung der Phygoide reduziert sich dann auf eine Elektronik, deren Bauteile im Elektronik-Shop höchstens 30.- DM kosten sollten.

Da dies aber noch nicht der Normalfall sein dürfte, soll noch einiges zum Fahrtmesser gesagt werden. Eine sehr einfache, sicher und gut funktionierende Lösung stellt ein kleines Flügelrad-Anemometer dar. Allerdings muß es vorläufig noch selbst gebaut werden, denn auf dem Markt erhältliche professionelle Geräte kosten etwa soviel wie eine gute RC-Anlage; selbst der Messkopf allein würde schon ein paar Hunderter verschlingen. Ein paar Tips zum Selbstbau folgen daher weiter unten. Das Flügelrad-Anemometer hat den Vorteil, daß seine Drehzahl und damit sein Ausgangssignal (egal, wie es gewonnen wird) ohne besondere Maßnahmen proportional zur Fluggeschwindigkeit ist.

Die meisten Fahrtmesser -auch die für Modell-Telemetrie bis dato angebotenen- arbeiten nach dem sog. "Wirkdruck-Prinzip", d.h. sie messen den von der Geschwindigkeit abhängigen Staudruck (Prandtl-Rohr) oder einen Unterdruck (Venturi-Rohr). Ebenso wie auf Kraftwirkung (z.B. Stauscheibe) beruhende Fahrtmesser haben sie aber die Eigenschaft, daß der Messwert prinzipiell quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst. Dies führt zu ganz speziellen Problemen im unteren Geschwindigkeitsbereich bis etwa 20 m/s; also gerade dort, wo die meisten Segelmodelle fliegen. Darauf einzugehen wäre Inhalt eines eigenen Artikels. Wünscht man eine lineare Kennlinie, d.h. einen der Geschwindigkeit proportionalen Messwert, so muß man durch Berechnung der Wurzel den quadratischen Zusammenhang wieder rückgängig machen. Für Nicht-Profis dürfte dies eine große Hürde sein, denn hierzu ist entweder eine anspruchsvolle Analogschaltung oder der Einsatz eines Mikrorechners notwendig.

Linearität ist nicht zwingend

Differenziert man nun, um dieses Problem zu umgehen, anstatt der Geschwindigkeit einfach deren vom Staudruckmesser gelieferten Quadratwert, so erhält man statt dv/dt den Wert $2 \cdot v \cdot dv/dt$. Darin ist der Faktor 2 ohne Bedeutung; dagegen bedeutet der Faktor v , daß unsere Aufschaltung mit steigender Geschwindigkeit größer wird. Es entsteht die Frage, wie das System darauf reagiert.

Auch hier hilft die Simulation weiter. Es eine Angelegenheit von wenigen Minuten, das Simulationsprogramm so abzuändern, daß statt dv/dt z.B. jetzt $v \cdot dv/dt$ aufgeschaltet wird, oder daß zunächst eine willkürliche, möglichst sinnvolle Funktion von v berechnet wird, die dann differenziert wird. So kann man die Kennlinien der unterschiedlichsten Fahrtmesserarten nachbilden und die Auswirkungen studieren. Nimmt man z.B. einen nach dem Hitzdrahtanemometer-Prinzip arbeitenden Fahrtmesser an, so hat dessen Kennlinie ebenfalls die Form einer Potenzfunktion, aber mit einem Exponent, der kleiner als 1 ist. Dieser Verlauf nach einer Wurfelfunktion bewirkt genau das Gegenteil wie die o.g. quadratische Abhängigkeit; je schneller das Modell fliegt, desto schwächer wird die Aufschaltung.

Interessehalber habe ich auf diese Art verschiedene Sensorkennlinien untersucht. Das Ergebnis war ziemlich überraschend: Die Phygoide-Unterdrückung funktionierte immer,

ohne daß sich irgendwelche “Auffälligkeiten” zeigten. Selbstverständlich musste dabei der Aufschaltfaktor an den Einzelfall angepaßt werden. Nun habe ich natürlich schon aus Zeitgründen nicht alle erdenklichen Kombinationen von Modelldaten, Anfangsbedingungen und Aufschaltfaktoren untersucht, und ein praktischer Beweis steht auch noch aus. Man kann aber zumindest vermuten, daß die Kennlinie des Fahrtmessers unkritisch ist und in gewissen Grenzen von einem linearen Verlauf abweichen darf, ohne daß sich dies negativ bemerkbar macht. Dies deckt sich auch mit praktischer Erfahrung mit einem “linearen” Fahrtmesser (s.u.), bei dem die Einstellung des Aufschaltfaktors sehr unkritisch ist.

Indem wir zum einen auf eine Kalibrierung und zum anderen auf exakte Linearität des Geschwindigkeitssensors verzichten können, wird es möglich, diesen einfach und preisgünstig zu bauen.

Nicht zuletzt aus Platzgründen ist es hier nicht möglich, darauf weiter einzugehen. Interessierte Modelltechniker können hierzu aber z.B. im Bereich der Consumer- oder KFZ-Elektronik Anregungen finden; auch sei das Studium von Fachliteratur empfohlen,

Zum Zeitverzug im Regler

Gelegentlich bin ich schon gefragt worden, ob normale Servos als Stellglied nicht zu “langsam” sind. Kurz gesagt, sie sind es nicht. In grober Näherung folgt dies schon daraus, daß die Reaktionszeit des Reglers wenigstens um den Faktor 5-10 kleiner sein sollte als die Schwingungsdauer des Modells. Letztere liegt bekanntlich bei 5 Sekunden oder mehr. Für übliche Servos, deren Stellzeiten typisch 0.15 Sekunden/40° oder darunter betragen, ist diese Bedingung in jedem Fall erfüllt.

Um das noch genauer zu wissen, habe ich den Einfluß von Zeitverzögerungen mit Hilfe der FLOWLEARN-Simulation untersucht. Dort gibt es die einfache Möglichkeit, “Verzögerungsglieder” in den Signalfluß einzuschalten, wobei deren Verzögerungszeit einstellbar ist. Die Ergebnisse zeigen, daß sich bei Verzögerungen bis etwa 1 Sekunde sehr wenig im Flug- bzw. Regelverhalten ändert. Bei weiterer Vergrößerung der Verzögerungszeit wird das Stabilisierungsverhalten langsam schlechter, und bei extremen Verzögerungszeiten (einige Sekunden) tritt dann erwartungsgemäß Instabilität auf.

Die Elektronik im Regler ist noch um Größenordnungen schneller, wir brauchen uns deshalb nicht damit zu befassen. Probleme kann es jedoch an einer Stelle geben, an die man zunächst nicht ohne weiteres denkt, nämlich beim Geschwindigkeitssensor. Dieser kann u.U. eine Zeitkonstante von einigen Sekunden aufweisen, beispielsweise dann, wenn diese absichtlich “eingebaut” ist, um eine ruhige Anzeige zu bewirken. Manche Geschwindigkeitsmesser integrieren prinzipiell über einige Sekunden, um Grob-Turbulenz auszumitteln. Bei Hitzdraht- oder Heißfilm-Anemometern muß man u.U. auch mit Zeitkonstanten in dieser Größenordnung rechnen.

Bei Fahrtmessern nach dem dem Wirkdruck-Prinzip (Staurohr usw.) sollte es keine Probleme geben, falls diese nicht aus anderen Gründen ebenfalls eine künstlich vergrößerte Zeitkonstante aufweisen.

Beim Flügelrad-Anemometer hängt es von der Bauform ab, ob evtl. Komplikationen durch eine zu große Zeitverzögerung drohen. Ist das Flügelrad sehr klein (15-20 mm Durchmesser), leicht gebaut, und wird es elektronisch abgetastet, so sind kaum Schwierigkeiten zu befürchten; die Drehzahl folgt dann in wenigen Millisekunden den Änderungen der Anströmgeschwindigkeit. Treibt es dagegen einen Tachogenerator an (wie unten beschrieben), so muß bei jeder Geschwindigkeitsänderung dessen Anker beschleunigt oder abgebremst werden. Ist das Flügelrad selbst auch "schwer" ausgeführt, so kann die Zeitkonstante wieder in die Größenordnung von Sekunden rücken. Nicht zuletzt aus diesem Grund habe ich bei meinen Eigenbau-Anemometern die kleinsten erhältlichen Glockenankermotoren verwendet und das Flügelrad möglichst leicht gebaut (z.B. mit Blättern aus Balsa).

Eine erste Realisierung

Nach den ermutigenden Ergebnissen der Simulationen habe ich bis jetzt drei solche "Mini-Flugregler" aufgebaut und erprobt. Diese unterscheiden sich nur in Details von Elektronik und Geschwindigkeitssensor, auf die einzugehen hier zu weit führen würde. Als Fahrtmesser habe ich selbstgebaute Flügelrad-Anemometer verwendet, die (um sie auch für andere Zwecke verwenden zu können) nach einem Vergleichsgerät kalibriert wurden. Die Flügelräder (25-30 mm Durchmesser) bestehen aus 4 mit Sekundenkleber "gehärteten" Balsablättern, die in eine geschlitzte Nabe aus Kunststoff eingeklebt sind (Bild 24).

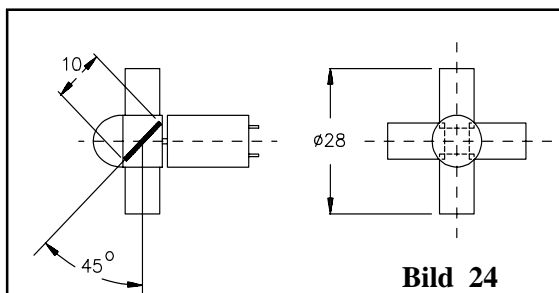


Bild 24

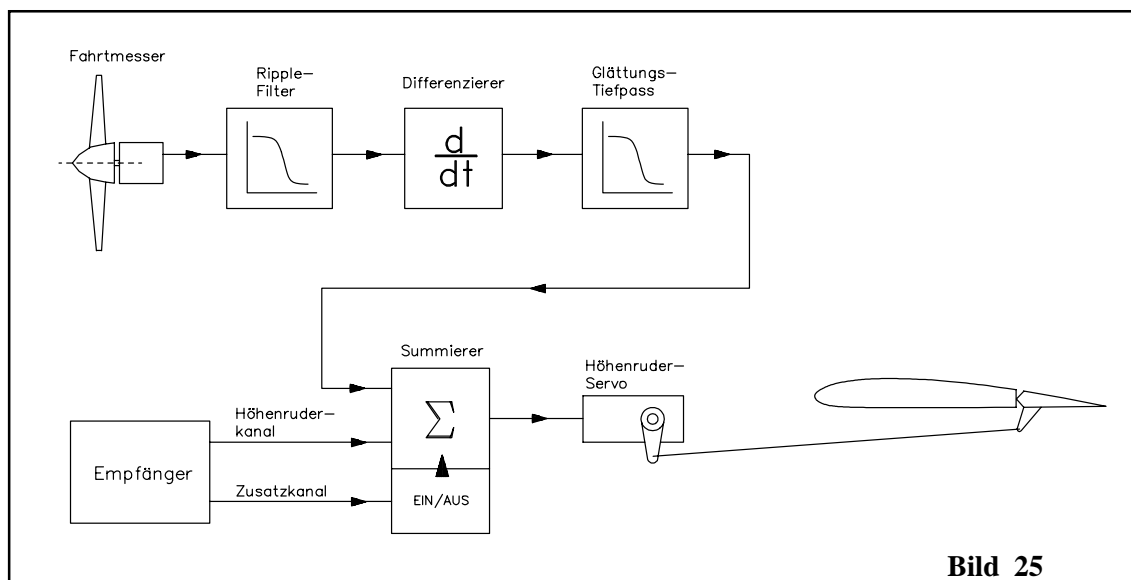
Die Blätter sind nicht profiliert und nicht verwunden. Da Drehzahlen über 20.000 U/min erreicht werden und andererseits ein Auswuchten des Flügelrads kaum möglich ist, bleibt nur übrig, dieses so symmetrisch und genau wie möglich zu bauen. Bei sorgfältigem Vorgehen gibt es jedoch damit keine Probleme.

Das Flügelrad treibt einen als Tachogenerator dienenden Glockenanker-Motor mit 10 bzw. 8 mm Durchmesser (Faulhaber) an. Da dessen Ausgangsspannung streng proportional der Drehzahl und diese weitgehend ebenfalls proportional der Geschwindigkeit ist, ergibt sich so ein Fahrtmesser mit fast perfekt linearer Kennlinie, der auch sehr gut für andere Messaufgaben verwendbar ist. Die erzielbare Genauigkeit ist insbesondere im Geschwindigkeitsbereich bis etwa 20 m/s weitaus besser als diejenige der z.Z. im Modellbauhandel erhältlichen Geschwindigkeitssensoren.

Hierbei hilft noch ein kleiner Trick : Wegen der Lager- und Bürstenreibung im Motor läuft das Flügelrad ohne besondere Maßnahmen erst bei etwa 5 m/s an und ein linearer Kennlinienverlauf ergibt sich erst ab etwa 7 m/s. Damit könnte man in unserer Anwendung ohne weiters leben. Es geht aber sehr einfach noch besser: Hierzu läßt man über einen Vorwiderstand aus der Versorgungsspannung einen kleinen "Hilfs"- bzw. Kompensationsstrom durch den Motor fließen. Er muß etwa so groß sein wie der Leerlaufstrom des Motors (bei den infrage kommenden Motoren zwischen 5 und 10 mA) und kompensiert dann gerade die Reibungsverluste.

Der erforderliche Wert des Vorwiderstandes wird experimentell ermittelt. Der Motor soll bei Anströmgeschwindigkeit Null gerade zu laufen beginnen oder sich ganz langsam drehen; der genaue Wert ist unkritisch. Ein besonderer Vorteil eines so aufgebauten Anemometers besteht darin, daß es Ausgangsspannungen in Größenordnung von einigen Volt liefert, was die Auslegung der weiteren Elektronik erleichtert. Letztere ist bei zwei Versuchsgeräten konventionell ausgeführt, bei einem um einen Microcontroller herum aufgebaut. Im letzteren Fall erfolgt die Signalverarbeitung einschließlich der Mischung mit dem Höhenrudersignal ausschließlich per Software; der Aufwand an restlicher elektronischer Hardware ist dann minimal. In der Funktion waren alle drei Versionen gleichwertig.

Als sehr nützlich bzw. sogar unverzichtbar erwies sich die vorgesehene Möglichkeit, den Regler über einen Zusatzkanal der RC-Anlage ein- und auszuschalten. Dies ermöglichte die risikolose Erprobung in Sicherheitshöhe. In Bild 25 ist das Blockschaltbild der Versuchsgeräte gezeigt.



Ergebnisse der Flugerprobung

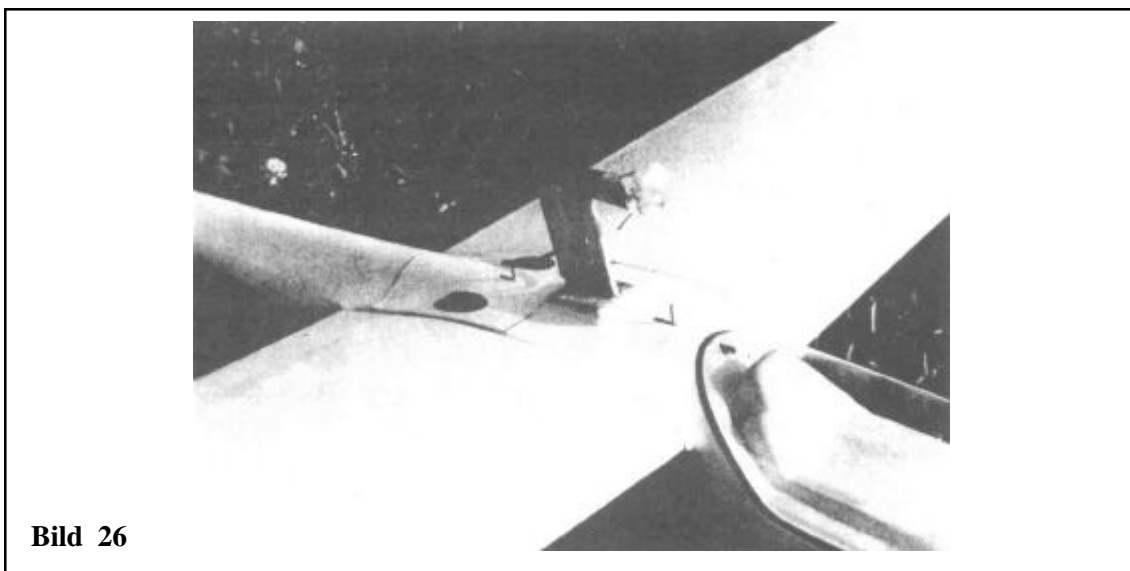
Die praktische Erprobung erfolgte in Segel- und Elektro-Segelmodellen und war vom ersten Flug an -mit kleinen Abstrichen (s.u.)- ein voller Erfolg. Der anfangs vorsichtig gewählte Aufschaltfaktor wurde im Lauf der Flüge langsam vergrößert. Er zeigte sich als in weiten Grenzen unkritisch. Der Automatik wurde maximal etwa der halbe Ruderausschlag eingeräumt, ein Übersteuern durch den Pilot war damit leicht möglich.

Das Modell verhält sich praktisch genau so, wie von der Simulation vorausgesagt. Es stabilisiert nach Störungen nahezu ideal und "wie aus dem Lehrbuch". Falls man es so will, kann man einen gesamten "glatten" Flug machen, ohne ein einzigesmal das Höhenruder zu betätigen (mit Ausnahme des Abfangens bei der Landung). Bei engen Kurven muß selbstverständlich wie üblich mit dem Höhenruder gezogen werden, aber nach dem Ausleiten der Kurve entfällt jede Höhenruderbetätigung.

Spektakulär ist es z.B., das Modell in steilen Sturzflug zu bringen und dann die Hand vom Höhenruderknüppel zu nehmen. Das Modell fängt innerhalb einer Schwingung vollautomatisch ab und geht wieder in den glatten Gleitflug über. Dasselbe passiert, wenn ein "Männchen" eingeleitet und dann im Gipfelpunkt ebenfalls die Höhensteuerung eingestellt wird.

Die Schwerpunktlage wird hinsichtlich der Längsstabilität unkritisch, da der Schwerpunkt weiter nach vorne gelegt werden kann, ohne daß Überstabilität auftritt. Einige Flüge mit Telemetrie haben gezeigt, daß bei eingeschalteter Automatik die Phygoidenbewegung auf etwa 1/3 der Amplituden des "ungeregelten" Falls begrenzt bleibt. Da bei diesen Flügen böiges Thermikwetter herrschte, waren diese "Restphygoiden" wohl unvermeidbar. Als Einbauort für den Fahrtmesser habe ich 3 Stellen versucht:

- a) Oben auf dem Tragflügel kurz vor der Endleiste, knapp außerhalb des Propellerkreises
- b) Auf dem Rumpf, etwa über Tragflügelmitte (Bild 26)
- c) Vor der Spitze des Seitenleitwerks



Im Gleitflug zeigte sich keinerlei Unterschied zwischen den Einbauorten.

Im Kraftflug traten bei Einbau am Seitenleitwerk starke α -Schwingungen auf, sodaß die Automatik ausgeschaltet werden musste.

Bei Einbau vorne auf dem Rumpf (also direkt im stärksten Propellerstrahl!) arbeitete die Automatik dagegen auch bei laufendem Antrieb einwandfrei. Selbstverständlich funktionierte sie beim Einbau auf dem Tragflügel auch bei laufendem Antrieb.

Und nun noch zu den erwähnten "Abstrichen".

Bei sehr starker Aufschaltung (wie sie zum normalen Fliegen nicht gebraucht wird) mußte bei Trudelversuchen einmal die "Notbremse" (Abschalten des Reglers) gezogen werden. Die Automatik fing das Modell zu früh und zu stark ab, mit der Folge eines neuen Strömungsabrisses, weiteres Trudeln, zu frühes Abfangen, usw.

Ebenfalls bei sehr starker Aufschaltung und bockigem Wetter treten α -Schwingungen auf, die den Flug unruhiger machen als ohne Regler. Diese Erscheinung kann als einfacher

Indikator für die Obergrenze des Aufschaltfaktors dienen. Wird -von dieser Einstellung ausgehend- die Aufschaltung wieder um ca. 30% reduziert, so ist sie annähernd optimal.

Beim Handstart "mit Schmackes" sind starke Nerven notwendig, besser läßt man dies aber bleiben oder schaltet die Automatik erst nach dem Start ein. Die anfängliche Beschleunigung beim Anlauf bzw. Schleudern wird vom Regler als "Modell wird zu schnell" interpretiert, er gibt Höhenruder, was zum steilen Hochziehen des Modells führt. Während das Modell "hochzieht" und dabei wieder langsamer wird, bemerkt er diesen Irrtum und drückt nach, aber dazu bleiben ihm nur Sekundenbruchteile bis zum Strömungsabriß. Vermutliche Ursache ist die Zeitverzögerung durch den Flügelrad-Fahrtmesser, der die rasche Fahrverminderung nicht schnell genug erkennt. Wird das Modell "normal" gestartet, tritt dieser Effekt nicht auf.

Der feste und ungeschützte Anbau des Fahrtmessers ans Modell ist nicht praxisgerecht. Beim Fliegen selbst passiert zwar nichts, dafür aber beim Transport und "Handling". Mehrfach mußten an- oder abgebrochene Blätter repariert werden. Durch eine andere Konstruktion und steckbare Ausführung des Fahrtmessers soll dem abgeholfen werden.

Das Simulationsprogramm

Das schon weiter oben erwähnte Rechenprogramm ist in Turbo-Pascal geschrieben. Es beruht auf der fortlaufenden Lösung der Phygoide-Bewegungsgleichungen mit dem Runge-Kutta-Verfahren; z.B. beschrieben in [7]. Die Ergebnisse werden in Kurvenform dargestellt; eine VGA-Karte im PC ist daher zwingend. Die Benutzung des Programms ist sehr einfach. In einem Menü kann zwischen Dateneingabe bzw. -änderung und den verschiedenen Diagramm-Ausgaben gewählt werden. Die Dateneingabe hat etwas Komfort, sodaß eine Neueingabe nur dort notwendig wird, wo Änderungen gewünscht werden. Es kann die Phygoide mit und ohne Regler studiert werden; zu letzterem wird nur der Aufschaltfaktor gleich Null gesetzt (Voreinstellung). Auf den folgenden Seiten ist ein Beispiel für den Programmlauf einschließlich der beiden Menüs dargestellt.

Zum Programm selbst muß hier nicht viel gesagt werden, da es übersichtlich strukturiert und gut kommentiert ist; s. das nachfolgende Listing. Nach der Variablen-Deklaration folgen wie üblich alle Prozeduren bzw. Funktionen; das am Schluß stehende Hauptprogramm greift auf diese zu und ist dadurch relativ kurz.

Ein Ausdrucken der Diagramme ist möglich, wenn vor Start des Programms ein (wie üblich mit Interrupt 5 aufgerufener) Graphik-Treiber bzw. Screendump-Utility geladen wird. Für die Diagramme ist bewußt nur schwarz/weiß-Wiedergabe vorgesehen, damit zum Ausdrucken notfalls auch der mit DOS gelieferte Graphik-Treiber GRAPHICS verwendet werden kann (GRAPHICS druckt nicht alle Farben).

Änderungen am Programm sollten etwas geübten PASCAL-Programmierern nicht schwerfallen. So können z.B. die Diagramme farbig gestaltet werden, anstelle von dv/dt können andere Aufschaltgrößen versucht werden, u.a.m.

Wer das Abtippen des nachstehenden Listings scheut, kann das Programm gegen DM 30.- (incl. Porto, Verpackung) von mir auf auf Diskette (3 1/2 oder 5 1/4 Zoll) bekommen. Auf der Diskette befinden sich Quelltext (.PAS) und die lauffähige Version (.EXE); sowohl wie hier abgedruckt für PCs ohne Coprozessor, als auch in schnellerer Version für PCs mit Coprozessor.

Literatur:

- [1] Glöckner, S., Die Schwerpunktlage schnell und einfach berechnet, FMT-Kolleg 2 (1988)
- [2] Kaminek, J., Schwerpunkbestimmung beim Flugmodell, FMT-Kolleg 13 (1992)
- [3] Reckzeh, D., Statische Längsstabilität und Schwerpunktlage bei Modellflugzeugen FMT-Kolleg 18 (1995)
- [4] Senn, H.P., Flugleistungsmessung an RC-Segelflugmodellen, ISF 1987 Baden/Schweiz; Vortrag u. Seminarunterlagen, sowie persönliche Mitteilung
- [5] Grave, G., Erhöhung der Längsstabilität von Flugmodellen, Modelltechnik und Sport, Folge 15 (1956)
- [6] Bonfig, W. u.a., Durchflußmessung in Flüssigkeiten und Gasen; Expert Verlag, 1990
- [7] Zurmühl, R., Praktische Mathematik, Springer Verlag, 1957

Beispiel für den Programmlauf

```

      A U S W A H L

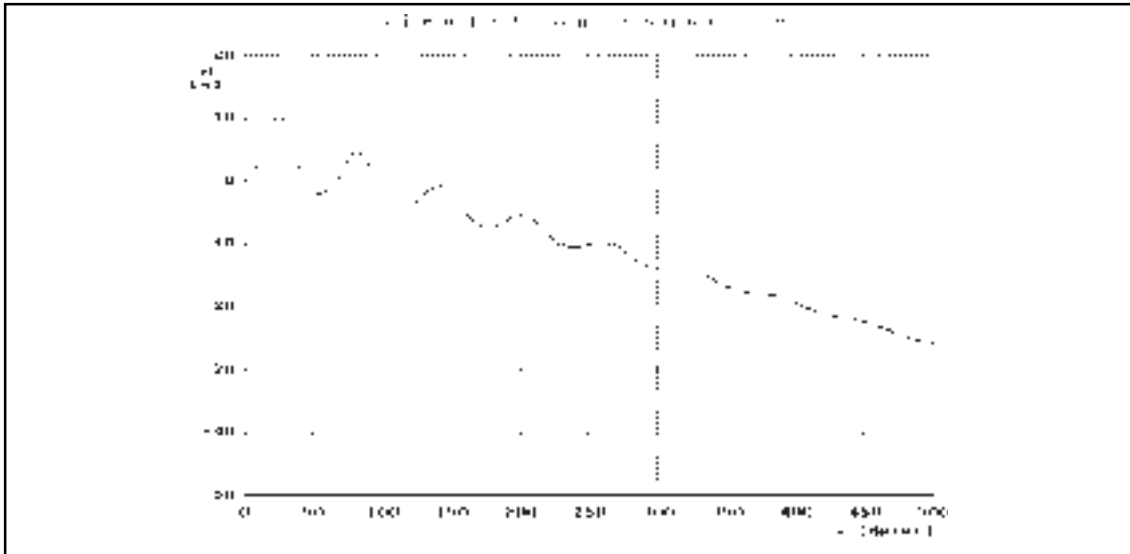
<0> . . . Programm beenden
<1> . . . Daten zeigen, ändern
<2> . . . Plot Höhe vs Strecke
<3> . . . Plot Höhe vs Zeit
<4> . . . Plot Geschwindigkeit vs Zeit
<5> . . . Plot Bahnwinkel vs Zeit

      Entsprechende Nummer wählen :
```

```

S i m u l a t i o n   P h y g o i d e
      Dateneingabe

Flächenbelastung   [N/m²]      :    50.0
ca                  [ - ]      :    0.60
Gleitzahl          [ - ]      :    20
Startwert für v [m/s]  :    17.0
Startwert für theta [Grad]:    - 5.0
Aufschaltfaktor k[ - ] :    0.000
```

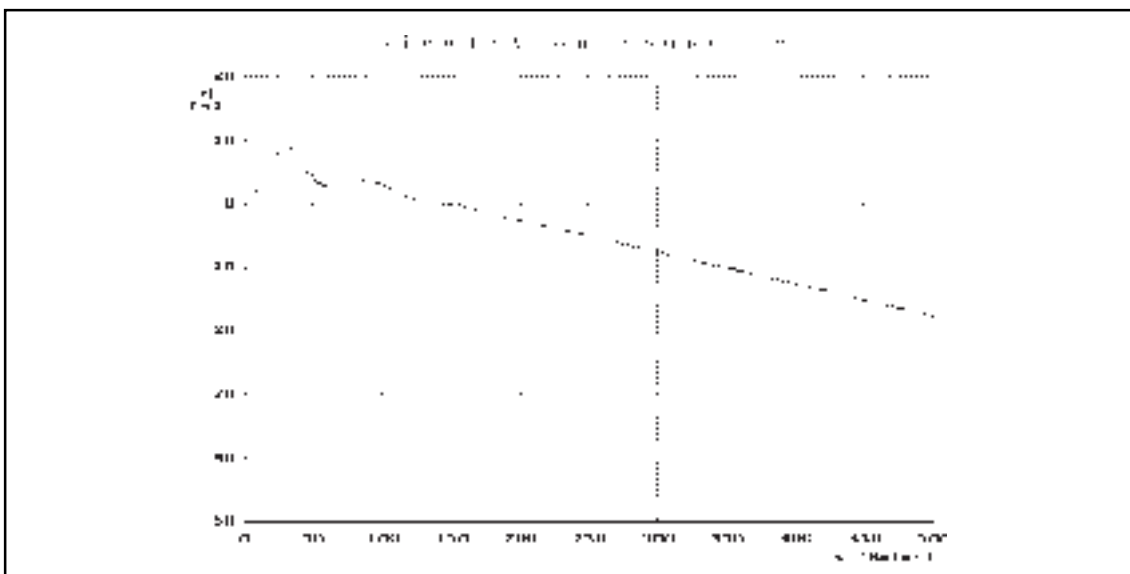


Das Ergebnis der umseitigen Eingaben. Regler außer Betrieb ($k=0$), die "Startbedingungen" sind grob falsch (5° nach oben, $v = 17 \text{ m/s}$).

Nun wird bei sonst unveränderten Daten der Regler mit $k = 0.03$ eingeschaltet:

S i m u l a t i o n P h y g o i d e
Dateneingabe

Flächenbelastung	[N/m ²]	:	50.0
ca	[-]	:	0.60
Gleitzahl	[-]	:	20
Startwert für v	[m/s]	:	17.0
Startwert für theta[Grad]		:	- 5.0
Aufschaltfaktor k	[-]	:	0.030




```

{=====}
{
      P H Y R E G
{ Simulation Phygoidenbewegung im Gleitflug, ohne und mit Aufschaltung von }
{ dv/dt auf ca. Das Programm löst hierzu die Differentialgleichungen der }
{ Phygoide mit Luftwiderstand nach dem Runge-Kutta-Algorithmus. }
{ (C) 1995 Helmut Schenk, Arlingerstr. 111, D - 75179 Pforzheim }
{=====}

program PHYREG;

{$N-}                                { Geht auch ohne Co-Prozessor }
uses crt,graph,dos;

const   g   = 9.81;                   { Erdbeschleunigung, [m/s^2] }
        rho = 1.22;                   { Luftdichte, [kg/m^3] }
        dt  = 0.05;                   { Zeitintervall für Integration, [s] }

var
  t,talt      : real;                 { Zeit, aktueller und letzter Wert [sec] }
  v            : real;                 { Bahngeschwindigkeit, [m/s] }
  valt        : real;                 { Dto., vorhergehender Wert }
  vst         : real;                 { Startwert der Geschwindigkeit, [m/s] }
  vx,vy       : real;                 { Geschwindigkeitskomponenten, [m] }
  vxalt,vyalt : real;                 { Dto., die jeweils vorhergehenden Werte }
  x,y         : real;                 { Bahnkoordinaten, [m] }
  xalt,yalt   : real;                 { Dto., die jeweils vorhergehenden Werte }
  GF          : real;                 { Flächenbelastung, [N/m^2] }
  ca          : real;                 { Gesamtes ca, [-] }
  ca0         : real;                 { Trimm-ca, [-] }
  theta       : real;                 { Bahnwinkel, [Grad] }
  thetaalt    : real;                 { Dto., vorhergehender Wert }
  theta0      : real;                 { Startwert des Bahnwinkels, [Grad] }
  E           : real;                 { Gleitzahl, [-] }
  eps         : real;                 { Reziproke Gleitzahl, [-] }
  k           : real;                 { Aufschaltfaktor, [sec^2/m] }
  w           : real;                 { Ungestörte Geschwindigkeit, [m/s] }
  bl         : real;                 { Längsbeschleunigung dv/dt, [m/s^2] }
  x0,y0       : integer;              { Nullpunktskoordinaten für Plots }
  txt         : string[4];            { String für Achsenbeschriftung in Plots }
  gd,gm       : integer;              { Graphik-Driver, Graphikmodus }
  tasks       : set of char;           { Menge der Menüpunkte }
  nr          : char;                 { Nummer der gewünschten Aktion }
  dummy       : char;                 { Hilfsgröße zur Tastenabfrage }
  stopflag    : boolean;              { Flag zum Abbruch der Hauptschleife }
  regs        : registers;            { Register für Screendump-Interrupt }

label start,waitloop;

{----- Intro -----}

procedure intro;
begin
  clrscr;
  gotoxy (1,5);

```

```

writeln ( ' *****' );
writeln ( ' *                               *' );
writeln ( ' *                               *' );
writeln ( ' *   Simulation der Phygoidenbewegung im Gleitflug *' );
writeln ( ' *   ohne und mit Aufschaltung eines Reglers.      *' );
writeln ( ' *   Dieser schaltet die Längsbeschleunigung dv/dt *' );
writeln ( ' *   dem Auftriebsbeiwert ca mit dem Faktor k auf. *' );
writeln ( ' *   Für k = 0 ist der Regler ausser Funktion.      *' );
writeln ( ' *                               *' );
writeln ( ' *                               (C)   H.Schenk 1995 *' );
writeln ( ' *                               *' );
writeln ( ' *                               Weiter mit jeder Taste ... *' );
writeln ( ' *****' );
gotoxy (55,16); dummy := readkey;
end;

```

```

{----- Menü -----}
procedure get_task;

begin
clrscr;
gotoxy (1,5);
writeln ( ' *****' );
writeln ( ' *                               A U S W A H L *' );
writeln ( ' *                               *' );
writeln ( ' *   <0> ... Programm beenden *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   <1> ... Daten zeigen, ändern *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   <2> ... Plot Höhe vs Strecke *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   <3> ... Plot Höhe vs Zeit *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   <4> ... Plot Geschwindigkeit vs Zeit *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   <5> ... Plot Bahnwinkel vs Zeit *' );
writeln ( ' *   *' );
writeln ( ' *   Entsprechende Nummer wählen: *' );
writeln ( ' *****' );
repeat
gotoxy (53,21); nr:= readkey;
until nr in tasks;
end;

```

```

{----- Raster für Plot theta(t) -----}
procedure ttgrid;
var i : integer;

begin
clearviewport;
x0:= 70; y0:= 250; { Nullpunkt }
line (x0,y0+150,x0+500,y0+150); { x-Achse, 10 pixel = 1 sec }

```

```

line (x0,y0+150,x0,y0-200);           { y-Achse, 25 pixel = 10 Grad }
setlinestyle (1,1,1);
for i:= 1 to 10 do line (x0+50*i,y0+150,x0+50*i,y0-200);   { x-Raster }
for i:= -8 to 6 do line (x0,y0+25*i,x0+500,y0+25*i);       { y-Raster }
setlinestyle (0,0,0);
for i:= 0 to 10 do                                           { x-Skala }
begin str (5*i,txt); outtextxy (x0+50*i-5,y0+160,txt); end;
outtextxy (x0+410,y0+175,'t [Sekunden]');
for i:= -4 to 3 do                                           { y-Skala }
begin str (-20*i:3,txt); outtextxy (x0-30,y0+50*i-4,txt); end;
outtextxy (x0-60,y0-190,'Theta');
outtextxy (x0-65,y0-175,'[Grad]');
end;

```

{————— Raster für Plot y(x) —————}

```

procedure yxgrid;
var      i      : integer;

begin
clearviewport;
x0:= 70; y0:= 150;                                           { Nullpunkt }
line (x0,y0+250,x0+500,y0+250);                             { x-Achse, 1 pixel = 1 m }
line (x0,y0+250,x0,y0-100);                                 { y-Achse, 5 pixel = 1 m }
setlinestyle (1,1,1);
for i:= 1 to 10 do line (x0+50*i,y0+250,x0+50*i,y0-100);   { x-Raster }
for i:= -2 to 5 do line (x0,y0+50*i,x0+500,y0+50*i);       { y-Raster }
setlinestyle (0,0,0);
for i:= 2 to 10 do                                           { x-Skala }
begin str (50*i,txt); outtextxy (x0+50*i-10,y0+260,txt); end;
outtextxy (x0-3,y0+260,'0'); outtextxy (x0+43,y0+260,'50');
outtextxy (x0+430,y0+275,'x [Meter]');
for i:= -2 to 5 do                                           { y-Skala }
begin str (-10*i:3,txt); outtextxy (x0-30,y0+50*i-4,txt); end;
outtextxy (x0-30,y0-90,'H');
outtextxy (x0-40,y0-80,'[m]');
end;

```

{————— Raster für Plot y(t) —————}

```

procedure ytgrid;
var      i      : integer;

begin
clearviewport;
x0:= 70; y0:= 150;                                           { Nullpunkt }
line (x0,y0+250,x0+500,y0+250);                             { x-Achse, 10 pixel = 1 sec }
line (x0,y0+250,x0,y0-100);                                 { y-Achse, 5 pixel = 1 m }
setlinestyle (1,1,1);
for i:= 1 to 10 do line (x0+50*i,y0+250,x0+50*i,y0-100);   { x-Raster }
for i:= -2 to 5 do line (x0,y0+50*i,x0+500,y0+50*i);       { y-Raster }
setlinestyle (0,0,0);
for i:= 0 to 10 do                                           { x-Skala }
begin str (5*i,txt); outtextxy (x0+50*i-5,y0+260,txt); end;
outtextxy (x0+410,y0+275,'t [Sekunden]');
for i:= -2 to 5 do                                           { y-Skala }
begin str (-10*i:3,txt); outtextxy (x0-30,y0+50*i-4,txt); end;

```

```

outtextxy (x0-30,y0-90,'H');
outtextxy (x0-40,y0-80,['m']);
end;

{————— Raster für Plot v(t) —————}
procedure vtgrid;
var      i      : integer;

begin
clearviewport;
x0:= 70; y0:= 400;                                { Nullpunkt }
line (x0,y0,x0+500,y0);                            { x-Achse, 10 pixel = 1 sec }
line (x0,y0,x0,y0-350);                            { y-Achse, 10 pixel = 1 m/s }
setlinestyle (1,1,1);
for i:= 1 to 10 do line (x0+50*i,y0,x0+50*i,y0-350); { x-Raster }
for i:= 1 to 7 do line (x0,y0-50*i,x0+500,y0-50*i); { y-Raster }
setlinestyle (0,0,0);
for i:= 0 to 10 do                                  { x-Skala }
begin str (5*i,tst); outtextxy (x0+50*i-5,y0+10,tst); end;
outtextxy (x0+410,y0+175,'t [Sekunden]');
for i:= 0 to 7 do                                  { y-Skala }
begin str (5*i:2,tst); outtextxy (x0-22,y0-50*i-4,tst); end;
outtextxy (x0-30,y0-340,'v');
outtextxy (x0-45,y0-330,['m/s']);
end;

{————— Daten zeigen und eingeben —————}
procedure get_data;
var      datastr      : string[6];
var      code         : integer;

begin
clrscr;
gotoxy (20,2); write ('S i m u l a t i o n   P h y g o i d e');
gotoxy (19,3); write ('—————');
gotoxy (33,4); write ('Dateneingabe');
gotoxy (20,8); write ('Flächenbelastung [N/m²] : ',GF:5:1);
gotoxy (20,10); write ('ca [-] : ',ca0:3:2);
gotoxy (20,12); write ('Gleitzahl [-] : ',E:2:0);
gotoxy (20,14); write ('Startwert für v [m/s] : ',vst:3:1);
gotoxy (20,16); write ('Startwert für theta [Grad] : ',theta0:3:1);
gotoxy (20,18); write ('Aufschaltfaktor k [-] : ',k:4:3);

gotoxy (60,8); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,GF,code);
gotoxy (50,8); clreol; gotoxy (50,8); write (GF:5:1);
end;

gotoxy (60,10); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,ca0,code);
gotoxy (50,10); clreol; gotoxy (52,10); write (ca0:3:2);
end;

```

```

gotoxy (60,12); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,E,code);
gotoxy (50,12); clreol; gotoxy (51,12); write (E:2:0);
end;

gotoxy (60,14); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,vst,code);
gotoxy (50,14); clreol; gotoxy (51,14); write (vst:3:1);
end;

gotoxy (60,16); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,theta0,code);
gotoxy (50,16); clreol; gotoxy (51,16); write (theta0:3:1);
end;

gotoxy (60,18); readln (datastr); if datastr <> '' then
begin
val (datastr,k,code);
gotoxy (50,18); clreol; gotoxy (52,18); write (k:4:3);
end;
end;

{———— Berechnung Beschleunigung in x-Richtung ———}
function bx (vx,vy : real) : real;
begin
bx:= g/w/w*sqrt(vx*vx+vy*vy)*(vy-eps*vx);
end;

{———— Berechnung Beschleunigung in y-Richtung ———}
function by (vx,vy : real) : real;
begin
by:= g - g/w/w*sqrt(vx*vx+vy*vy)*(vx + eps*vy);
end;

{———— Aufschaltung des Reglers auf ca bzw. w ———}
procedure calc_ca;

begin
bl:= (v - valt)/dt; { Längsbeschleunigung }
ca:= ca0 + k*bl; { Gesamtes ca }
w:= sqrt(2*GF/rho/ca); { Geschwindigkeit w }
end;

{———— Numerische Integration mit Runge-Kutta Verfahren ———}
procedure runge_kutta (t1,x1,y1,xlp,ylp : real);

var x2, x3, x4, { Temporäre Zwischenwerte }
y2, y3, y4,
x2p, x3p, x4p,
y2p, y3p, y4p,
x1pp, x2pp, x3pp, x4pp,
y1pp, y2pp, y3pp, y4pp,

```

```

k1, k2, k3, k4, k, kp,
l1, l2, l3, l4, l, lp                : real;

begin
  y1pp:= by (x1p,y1p);
  x1pp:= bx (x1p,y1p);
  k1:= y1pp*dt*dt/2; l1:= x1pp*dt*dt/2;

  y2:= y1 + y1p*dt/2 + k1/4; y2p:= y1p + k1/dt;
  x2:= x1 + x1p*dt/2 + l1/4; x2p:= x1p + l1/dt;
  y2pp:= by (x2p,y2p); k2:= y2pp*dt*dt/2;
  x2pp:= bx (x2p,y2p); l2:= x2pp*dt*dt/2;

  y3:= y2; y3p:= y1p + k2/dt;
  x3:= x2; x3p:= x1p + l2/dt;
  y3pp:= by (x3p,y3p); k3:= y3pp*dt*dt/2;
  x3pp:= bx (x3p,y3p); l3:= x3pp*dt*dt/2;

  y4:= y1 + y1p*dt + k3; y4p:= y1p + 2*k3/dt;
  x4:= x1 + x1p*dt + l3; x4p:= x1p + 2*l3/dt;
  y4pp:= by (x4p,y4p); k4:= y4pp*dt*dt/2;
  x4pp:= bx (x4p,y4p); l4:= x4pp*dt*dt/2;

  k:= (k1 + k2 + k3)/3;
  kp:= (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
  l:= (l1 + l2 + l3)/3;
  lp:= (l1 + 2*l2 + 2*l3 + l4)/6;

  { Neue Werte am Intervallende }
  t:= t1 + dt; { Neuer Zeitpunkt }
  vx:= x1p + 2*lp/dt; vy:= y1p + 2*kp/dt; { Neue Geschwindigkeiten }
  v:= sqrt (vx*vx + vy*vy);
  theta:= 57.3*arctan(vy/vx); { Neuer Bahnwinkel }
  x:= x1 + x1p*dt + l; y:= y1 + y1p*dt + k; { Neue Bahnpunkte }
end;

{=====}
{===== Hauptprogramm =====}
{=====}

begin
gd:= detect; initgraph (gd,gm,'');
restorecrtmode; directvideo:= false;
intro;

E:= 16; vst:= 15; theta0:= 11; { Beispieldaten }
GF:= 50; ca0:= 0.6; k:= 0;
tasks:= ['0'..'5'];

start:
get_task; { Auswahl }
if nr = '0' then exit;
if nr = '1' then begin get_data; goto start; end;

t:= 0; talt:= 0; { Startwerte für Rechnung setzen }

```

```

x:= 0; y:= 0;
ca:= ca0; eps:= 1/E;
v:= vst; valt:= v;
theta:= theta0; thetaalt:= theta;
vx:= v*cos(theta0/57.3); vy:= v*sin(theta0/57.3);
vxalt:= vx; vyalt:= vy;

setgraphmode (vgahi); { Graphikmodus setzen }
case nr of '2' : yxgrid; { Skalen und Raster }
           '3' : ytgrid;
           '4' : vtgrid;
           '5' : ttgrid;
end;
gotoxy (22,2); write ('S i m u l a t i o n   P h y g o i d e');
line (165,32,465,32);
stopflag:= false;
setviewport (0,50,600,400,clipon); { Plotfenster setzen }

{----- Hauptschleife -----}
repeat
calc_ca; { Aufschaltung des Reglers }
vxalt:= vx; vyalt:= vy; { Letzte Werte retten }
xalt:= x; yalt:= y;
valt:= v;
talt:= t;
thetaalt:= theta;
runge_kutta (t,x,y,vx,vy); { Neue Werte berechnen }

case nr of
  '2' : begin { Plot y(x) }
        line (x0+round(xalt),y0-50+round(5*yalt),
              x0+round(x),y0-50+round(5*y));
        if (x >= 500) or (y >= 50) then stopflag:= true;
        end;

  '3' : begin { Plot y(t) }
        line (x0+round(10*talt),y0-50+round(5*yalt),
              x0+round(10*t),y0-50+round(5*y));
        if (y >= 50) or (t >= 50) then stopflag:= true;
        end;

  '4' : begin { Plot v(t) }
        line (x0+round(10*talt),y0-50-round(10*valt),
              x0+round(10*t),y0-50-round(10*v));
        if t >= 50 then stopflag:= true;
        end;

  '5' : begin { Plot theta(t) }
        line (x0+round(10*talt),y0-50-round(2.5*thetaalt),
              x0+round(10*t),y0-50-round(2.5*theta));
        if t >= 50 then stopflag:= true;
        end;
end; { Ende case of.. }
until stopflag = true; { Ende Hauptschleife }

```

```

setviewport (0,0,639,479,clipon);           { Wieder volles Fenster }
outtextxy (0,450,'Hardcopy   Andere Tasten -> Weiter');
waitloop:
dummy:= upcase (readkey);
if dummy = 'H' then begin                   { Bildschirminhalt drucken }
    intr(5,regs); goto waitloop;
end;

restorecrtmode;                             { Wieder Textmode }
goto start;                                { Auf ein Neues ... }

end.

```