

**Michael Gatting**

# Untersuchung der Flugeigenschaften von Flugzeugen anhand der Phygoidbewegung

**Diplomarbeit**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2004 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783832484620

**Michael Gatting**

**Untersuchung der Flugeigenschaften von Flugzeugen  
anhand der Phygoidbewegung**



---

Michael Gatting

# **Untersuchung der Flugeigenschaften von Flugzeugen anhand der Phygoidbewegung**

**Diplomarbeit  
Hochschule Bremen (FH)  
Fachbereich Maschinenbau  
Abgabe Oktober 2004**



Diplomica GmbH ———  
Hermannstal 119k ———  
22119 Hamburg ———

Fon: 040 / 655 99 20 ———  
Fax: 040 / 655 99 222 ———

agentur@diplom.de ———  
www.diplom.de ———

ID 8462

Gatting, Michael: Untersuchung der Flugeigenschaften von Flugzeugen anhand der Phygoidbewegung

Hamburg: Diplomica GmbH, 2004

Zugl.: Hochschule Bremen (FH), Diplomarbeit, 2004

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2004

Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	1
2 Stabilität .....	3
2.1 Statische Stabilität .....	3
2.2 Dynamische Stabilität .....	4
3 Die Eigenbewegungen.....	6
3.1 Die Anstellwinkelschwingung .....	6
3.2 Die Phygoidebewegung .....	7
4 Aerodynamische Nomenklatur.....	9
5 Statische Längsstabilität.....	12
5.1 Nickmoment des Flügels.....	14
5.2 Nickmoment des Rumpfs und der Gondeln .....	15
5.3 Nickmoment des Höhenleitwerks .....	16
5.4 Beitrag des Triebwerks.....	18
5.5 Gesamtflugzeug.....	18
6 Die Gleichungen der Längsbewegung .....	20
6.1 Die allgemeinen Bewegungsgleichungen des starren Körpers .....	20
6.2 Die ungesteuerte Längsbewegung.....	25
6.2.1 Exakte Phygoideberechnung und Darstellung mit Stabilitätsbeiwerten.....	25
6.2.2 Prüfung der Stabilität anhand der charakteristischen Gleichung .....	32
6.2.3 Näherungslösung für die Phygoidebewegung.....	33
7 Flugeigenschaftsforderungen und Vorschriften .....	35
7.1 Vorschriften für die Phygoidebewegung .....	35
7.2 Flugeigenschaftsforderungen .....	35
8 MATLAB-Modell zur Berechnung der Phygoide .....	38
8.1 Programmbeschreibung.....	38
8.2 Schematische Darstellung der Ein- und Ausgabedaten.....	39
9 Vergleich der MATLAB-Ergebnisse mit realen Schwingungsdaten.....	41
9.1 Beschreibung des Flugzeugmusters Cessna F172 M.....	41
9.2 Flugversuch .....	42
9.2.1 Versuchsbeschreibung.....	42
9.2.2 Versuchsdaten .....	42
9.2.3 Auswertung der Messdaten .....	43

9.2.4 Versuchsergebnisse .....	44
9.3 Berechnung mit dem MATLAB-Programm .....	44
9.3.1 Näherungsberechnung .....	44
9.3.2 Exakte Berechnung .....	45
9.4 Ergebnis.....	46
10 Einfluss des Flugzustandes auf die Phygoidebewegung.....	47
10.1 Beschreibung der Flugzeugmuster .....	47
10.1.1 Boeing 747-100 .....	47
10.1.2 Lockheed Jetstar .....	48
10.2 Einfluss der Flughöhe und –geschwindigkeit .....	49
10.3 Einfluss der Schwerpunktlage .....	53
10.4 Einfluss des Flugbahnwinkels .....	57
11 Die Phygoidebewegung verschiedener Flugzeuge in speziellen Flugzuständen.....	60
11.1 North American Navion .....	60
11.2 Beech M99 .....	64
11.3 Fairchild / Dornier 328.....	68
11.4 Lockheed Jetstar.....	72
11.5 Lear Jet 24 .....	75
11.6 McDonnell Douglas DC-8 .....	79
11.7 Boeing 707 .....	82
11.8 Airbus A300 .....	85
11.9 Convair 880.....	88
11.10 Boeing 747-100 .....	91
11.11 Aerospatiale - Britisch Aerospace Concorde .....	94
12 Handhabung des Schwingungsverhaltens bei der Auslegung von modernen Verkehrsflugzeugen .....	98
12.1 Leitwerksauslegung.....	99
12.1.1 Leitwerksauslegung bei natürlicher Stabilität .....	99
12.1.2 Leitwerksauslegung bei Verzicht auf natürliche Stabilität .....	102
12.2 Flugreglerauslegung .....	105
12.2.1 Modifikation der Phygoidebewegung durch Regelung .....	106
12.2.2 Nicklageregelung .....	109
12.2.3 Fahrtregelung mit Hilfe des Schubes (Vortriebsregler) .....	111
12.3 Zusammenfassung.....	112

---

13 Fazit.....	113
14 Anhang .....	115
14.1 Geometrische und aerodynamische Daten der untersuchten Flugzeuge.....	116
14.1.1 Cessna 172.....	116
14.1.2 North American Navion .....	117
14.1.3 Beech M99 .....	118
14.1.4 Fairchild / Dornier 328.....	119
14.1.5 Lockheed Jetstar .....	120
14.1.6 Lear Jet 24 .....	123
14.1.7 McDonnell Douglas DC-8 .....	124
14.1.8 Boeing 707 .....	125
14.1.9 Airbus A300 .....	126
14.1.10 Convair 880.....	127
14.1.11 Boeing 747-100.....	128
14.1.12 Aerospatiale - Britisch Aerospace Concorde .....	131
14.2 MATLAB-Modell .....	132
14.2.1 Quelltext.....	132
14.2.2 Ausgabedatei .....	136
14.2.3 Darstellungen .....	138
14.2.4 Modell zur Schwerpunktvariation.....	139
15 Zeichenerklärung.....	140
16 Literaturverzeichnis.....	148
17 Abbildungsverzeichnis .....	151
18 Versicherung .....	155

# 1 Einführung

Ein Flugzeug benötigt zufrieden stellende Flugeigenschaften, sowie Flugleistungen. „Bei der Betrachtung der Flugeigenschaften befasst man sich mit Fragestellungen zur Stabilität und Steuerbarkeit des Flugzeugs.“<sup>1</sup> Um die Belastung des Piloten so weit wie möglich zu reduzieren, muss das Flugzeug eine angemessene Stabilität besitzen. Das heißt, wenn ein Flugzeug durch eine Störung aus seinem Gleichgewichtszustand gebracht wird, sollte es die Tendenz haben, wieder ins Gleichgewicht zurückzukehren, ohne dass der Pilot einen großen Teil seiner Aufmerksamkeit der Stabilisierung widmen muss.

„Ein besonderes Interesse gilt dabei dem Schwingungsverhalten des Flugzeugs. Hier unterscheidet man langperiodische Schwingungsbewegungen wie die Phygoidebewegung und hochfrequente Bewegungen wie die Anstellwinkelschwingung.“<sup>2</sup>

„Die Phygoide tritt bei jedem Flugzeug auf und soll deshalb im Rahmen dieser Arbeit detailliert untersucht werden.“<sup>3</sup>

Die Untersuchung umfasst zunächst den physikalischen bzw. flugmechanischen Hintergrund und die mathematische Beschreibung der Bewegung (Kapitel 2-7). Zur Berechnung und Darstellung wird ein MATLAB-Modell erstellt, dessen Ergebnisse zunächst mit den Resultaten eines praktischen Flugversuchs verglichen werden (Kapitel 8,9). Danach wird mithilfe des Modells der Einfluss des Flugzustandes auf die Phygoide anhand zweier Beispielflugzeuge untersucht (Kapitel 10). Dazu werden verschiedene wichtige Parameter variiert. Im Folgenden wird dann, ebenfalls unter Anwendung des entwickelten MATLAB-Modells, die Phygoidebewegung verschiedener Passagierflugzeuge in speziellen Flugphasen untersucht (Kapitel 11) und bezüglich ihrer Flugeigenschaften bewertet. Im Anschluss werden die Handhabung des Schwingungsverhaltens beim Flugzeugentwurf und die Möglichkeit der Beeinflussung durch Flugregler beschrieben (Kapitel 12).

---

<sup>1</sup> Steckemetz, Bernd: Aufgabenstellung zur Diplomarbeit, Untersuchung der Flugeigenschaften von Flugzeugen anhand der Phygoide-Bewegung.

<sup>2</sup> Ebenda.

<sup>3</sup> Ebenda.

Die detaillierte Untersuchung der Phygoidbewegung im allgemeinen und im Speziellen für verschiedene Flugzeuge und Parametereinflüsse, sowie im modernen Flugzeugentwurf stellt das Ziel dieser Arbeit dar.

## 2 Stabilität

Unter der Stabilität eines Flugzeugs versteht man dessen Fähigkeit nach einer Störung zum Ausgangsflugzustand zurückzukehren, ohne dass der Pilot darauf Einfluss nehmen muss<sup>4</sup>. „Als Störungen ergeben sich z.B. kurze Steuerausschläge oder der Einfluss von atmosphärischen Störungen, wie Böen.“<sup>5</sup> Um einen sicheren und sowohl für die Passagiere wie auch für den Piloten akzeptablen Flug zu gewährleisten, muss das Flugzeug also eine ausreichende Stabilität innehaben.

Auf der anderen Seite muss ein Flugzeug eine geeignete Reaktion auf Steuerbetätigungen zeigen. Der Begriff der Steuerbarkeit bezieht sich daher auf die Fähigkeit eines Flugzeugs, auf Steuereingaben zu reagieren, um die gewünschte Bewegung aus dem bisherigen zu einem neuen Flugzustand zu ermöglichen. Stabilität steht also im Gegensatz zur Steuerbarkeit.<sup>6</sup> Es ist zwar möglich, Flugzeuge ohne natürliche Stabilität zu fliegen, so ist dies jedoch unsicher oder erhöht die Arbeitsbelastung des Piloten, wenn kein System zur Erlangung künstlicher Stabilität vorhanden ist.<sup>7</sup> Man unterscheidet zwischen statischer und dynamischer Stabilität:

### 2.1 Statische Stabilität

Stabilität ist eine Eigenschaft des Gleichgewichtszustandes. Um Stabilität zu diskutieren, muss zuerst Gleichgewicht definiert werden. Wenn sich ein Flugzeug in einem gleichförmigen Flugzustand befindet, sind die resultierende Kraft und das resultierende Moment um den Schwerpunkt gleich Null. Ein Flugzeug, das diese Voraussetzungen erfüllt, befindet sich im Gleichgewicht bzw. in einem ausgetrimmten Flugzustand.<sup>8</sup>

Statische Stabilität ist die Tendenz des Fluggerätes nach einer Störung in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren (positive statische Stabilität). Negative statische Stabilität oder statische Instabilität ist vorhanden, wenn das Fluggerät die Tendenz hat sich in Richtung der Störung und weg vom Gleichgewichtszustand zu bewegen. Neutrale statische Stabilität bedeutet, dass das Flugzeug weder die Tendenz hat, sich in Richtung der Störung

---

<sup>4</sup> Vgl. Kermode, A.C.: Mechanics of Flight. Harlow, England <sup>10</sup>1996, S. 274.

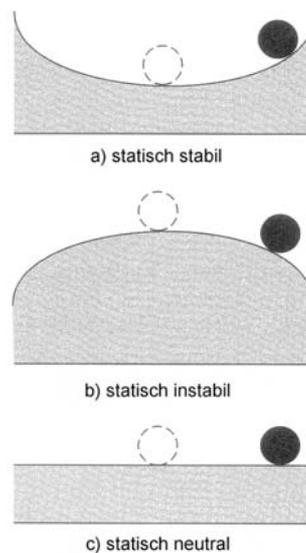
<sup>5</sup> Steckemetz, Bernd: Umdruck zur Lehrveranstaltung Flugmechanik. Bremen 2000, S. 114.

<sup>6</sup> Vgl. LFT BRE OS1/T: Principles of Flight 1 Handout. Bremen 1985, S. 60.

<sup>7</sup> Vgl. Nelson, Robert C.: Flight Stability and Automatic Control. Boston, Burr Ridge, Dubuque, u.a. USA <sup>2</sup>1998, S. 39.

<sup>8</sup> Vgl. Ebenda, S. 40.

noch sich zurück ins Gleichgewicht zu bewegen.<sup>9</sup> Ein Beispiel der verschiedenen Arten statischer Stabilität ist in Abbildung 2.1 zu sehen.



**Abbildung 2.1** Statische Stabilität

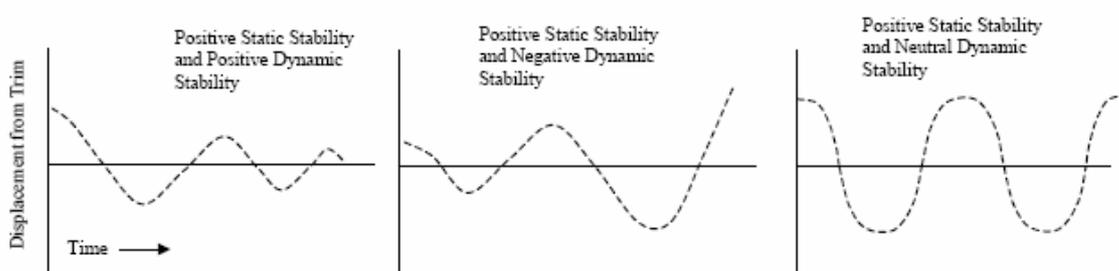
## 2.2 Dynamische Stabilität

Bei der Betrachtung der dynamischen Stabilität muss man das Flugverhalten in Abhängigkeit der Zeit untersuchen, nachdem das Flugzeug durch eine Störung aus dem Gleichgewicht gebracht wurde. Die Art der dynamischen Stabilität wird durch die resultierende Bewegung bestimmt. Eine Reduzierung der Amplitude der Bewegung deutet darauf hin, dass ein Widerstand gegen diese Bewegung besteht und dafür Energie aufgewendet wird. Dies wird positive Dämpfung genannt und die Bewegung ist dynamisch stabil. Wird dem System Energie zugeführt, so vergrößert sich die Amplitude, und die Dämpfung, sowie die dynamische Stabilität sind negativ. Das Fluggerät ist dynamisch instabil. Bleibt die Bewegung gleich, spricht man von neutraler dynamischer Stabilität. Positive Dämpfung eines Flugzeuges wird durch Kräfte und Momente ermöglicht, die infolge der Bewegung entstehen und dieser entgegengerichtet sind. So wird die Bewegung mit der Zeit ausgedämpft.<sup>10</sup> Abb. 2.2 zeigt die verschiedenen Arten dynamischer Stabilität.

<sup>9</sup> Vgl. LFT BRE OS1/T: Principles Of Flight 1, S. 61.

<sup>10</sup> Vgl. Nelson: Flight Stability and Automatic Control, S. 41f.

Von besonderem Interesse ist der Grad der dynamischen Stabilität. Dieser wird üblicherweise durch die Zeit bestimmt, die notwendig ist, um die Störung bis zum halben Wert der ursprünglichen Amplitude zu dämpfen. Liegt negative dynamische Stabilität vor ist dies die Zeit bis zur Verdoppelung der Ursprungsamplitude. Bei einer Schwingungsbewegung sind außerdem die Periode und die Frequenz von großer Wichtigkeit.<sup>11</sup>



**Abbildung 2.2** Dynamische Stabilität

Ein Flugzeug, das statisch stabil ist, muss also nicht gleichzeitig dynamisch stabil sein. Ist es allerdings dynamisch stabil, so ist die statische Stabilität in jedem Falle auch positiv.

<sup>11</sup> Vgl. Nelson: Flight Stability and Automatic Control, S. 42.

### 3 Die Eigenbewegungen

Es gibt zwei verschiedene Eigenbewegungsformen in der Symmetrieebene: die hochfrequente Anstellwinkelschwingung und die langperiodische Bahnschwingung, die Phygoidbewegung.

#### 3.1 Die Anstellwinkelschwingung

Die Anstellwinkelschwingung wird durch eine Änderung des Anstellwinkels z.B. durch eine Bö oder einer Steuereingabe erzeugt. Das Flugzeug reagiert mit einem schnellen Überschießen der Flugbahn und pendelt sich auf dem ursprünglichen Winkel wieder ein, sofern nicht durch Steuereingaben vom Piloten ein neuer Anstellwinkel gewählt wird (Abb. 3.1). Der Grad der statischen Stabilität bestimmt die Reaktion eines Flugzeugs auf eine Anstellwinkeländerung. Je höher der Grad der statischen Stabilität, desto kürzer die Periode und desto größer die Dämpfung.<sup>12</sup>

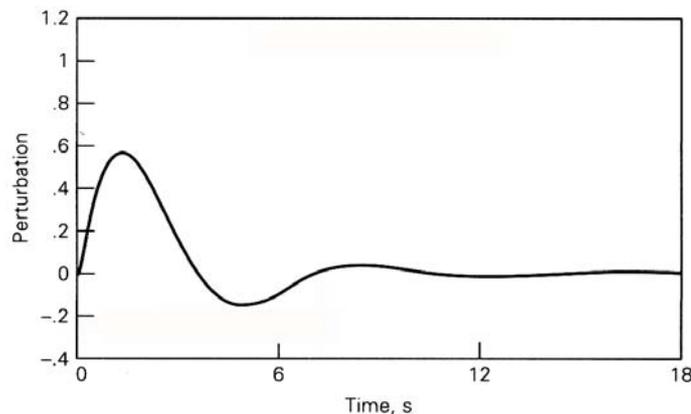


Abbildung 3.1 Die Anstellwinkelschwingung

Bei dieser Schwingung variiert hauptsächlich der Anstellwinkel, wobei die Höhe und die Geschwindigkeit nahezu konstant bleiben. Positive Dämpfung dieser Bewegung ist sehr wichtig, da bei einer divergierenden Schwingung sehr schnell hohe Fliehkräfte auftreten können. Die Anstellwinkelschwingung ist vom Piloten sehr schwer zu kontrollieren, da die Frequenz in einem Bereich liegt, in dem so genannte *Pilot Induced Oscillations (PIO)* entstehen können.<sup>13</sup> Das sind vom Piloten angefachte Schwingungen des Flugzeugs, die unbeabsichtigt durch das Bemühen entstehen, das Flugzeug zu steuern. Ein solches Verhalten

<sup>12</sup> Vgl. Crawford, Bill: Flightlab Ground School, 7. Longitudinal Dynamic Stability. 2003.

URL: [http://www.flightlab.net/pdf/7\\_LongitudinalDynamicStability.pdf](http://www.flightlab.net/pdf/7_LongitudinalDynamicStability.pdf). Stand: 7.6.2004. S. 3.

<sup>13</sup> Vgl. Ebenda.

kann zu gefährlichen Flugzuständen führen und muss deshalb vermieden werden. Die Anstellwinkelschwingung wird hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, da in dieser Arbeit nur die Phygoidbewegung detailliert untersucht wird.

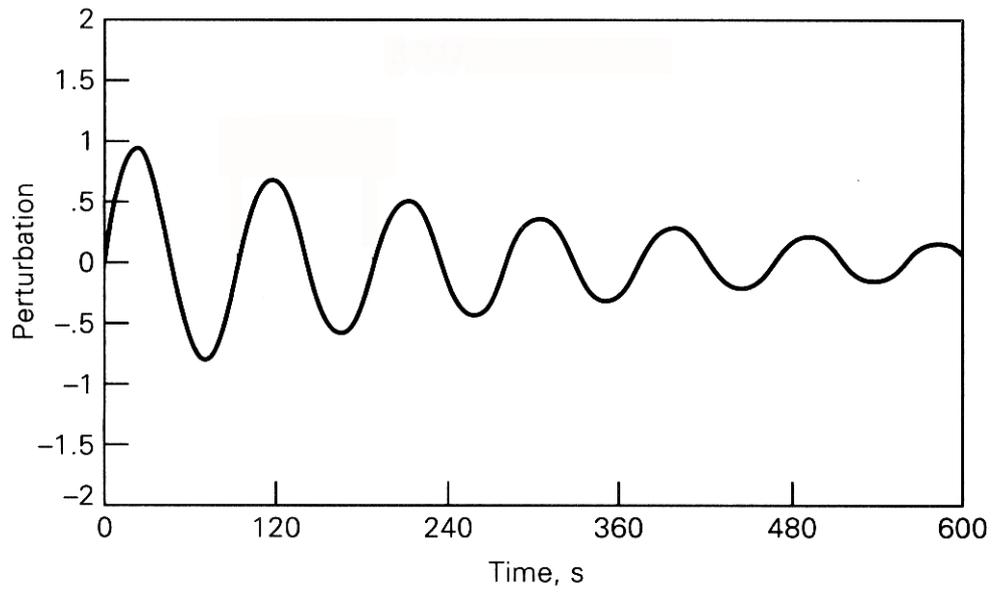
### **3.2 Die Phygoidbewegung**

Während der Phygoidbewegung bleibt der Anstellwinkel nahezu konstant, während sich Geschwindigkeit und Flughöhe periodisch ändern. Potenzielle Energie (Höhe) und kinetische Energie (Geschwindigkeit) werden hier zyklisch gegeneinander ausgetauscht.<sup>14</sup> Die Bewegung kann z.B. durch ein Aufnicken ausgelöst werden, mit dem eine Reduktion der Geschwindigkeit und eine Flughöhenzunahme einhergeht. Durch die geringere Geschwindigkeit wird das Verhältnis von Auftrieb zu Gewicht kleiner und bei positiver statischer Stabilität senkt sich die Flugzeugnase und die Geschwindigkeit nimmt wieder zu, während die Flughöhe abnimmt. Danach wiederholt sich die Bewegung. Bei positiver Dämpfung, bzw. positiver dynamischer Stabilität werden die Abweichungen vom ursprünglichen Flugzustand immer geringer und die Schwingung wird ausgedämpft. Dies kann bis zu einigen Minuten dauern. Die niedrigste Geschwindigkeit hat das Flugzeug am höchsten Punkt und die höchste Geschwindigkeit am tiefsten Punkt der Flugbahn. Die Phygoidbewegung ist im Gegensatz zur Anstellwinkelschwingung vom Piloten leicht zu kontrollieren, da hier die Periodendauer groß genug ist, um darauf zu reagieren. Im Normalfall ist die Schwingung konvergent, kann aber auch neutral oder sogar leicht divergent sein, wobei das Flugzeug immer noch kontrollierbar bleibt. Wird das Flugzeug von Hand geflogen, so kann bei zu leichter oder sogar negativer Dämpfung die Arbeitsbelastung des Piloten zunehmen, da es schwieriger wird, das Flugzeug auszutrimmen. So können Abweichungen von Geschwindigkeit und Höhe häufiger auftreten.<sup>15</sup> Ein Beispiel einer Phygoidbewegung ist in Abb. 3.2 dargestellt.

---

<sup>14</sup> Vgl. LFT BRE OS1/T: Principles of Flight 2 Handout. Bremen 1985, S. 27.

<sup>15</sup> Vgl. Crawford: Flightlab Ground School, S. 4.



**Abbildung 3.2** Die Phygoïdbewegung