

DYNAMISCHER SEGELFLUG MIT 900 KM/H

G. Sachs und B. Grüter
Lehrstuhl für Flugsystemdynamik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Übersicht

Der dynamische Segelflug ist eine antriebslose Flugmethode, bei der die für den Flug erforderliche Energie aus einem höhenveränderlichen Horizontalwind gewonnen wird. Eine Möglichkeit zum dynamischen Segelflug mit hoher Geschwindigkeit bieten Windszenarios hinter Berggrücken, bei denen eine dünne Scherschicht das darüber liegende Gebiet eines starken Horizontalwinds von dem darunter befindlichen Gebiet mit ruhender Luft trennt. Zur Behandlung dieser Möglichkeit, die extreme Geschwindigkeiten für Modellsegelflugzeuge erlaubt, werden geeignete Flugmechanik- und Wind-Modellierungen entwickelt, um die Bewegung des Fluggerätes in einem veränderlichen Windfeld beschreiben zu können. Hiermit können der Energiegewinn aus dem Wind und die dadurch mögliche höchste Geschwindigkeit bestimmt werden, die mit dem dynamischen Segelflug erzielbar ist. Unter Verwendung eines effizienten Optimierungsverfahrens werden Flugbahn sowie Zustands- und Steuergrößen für eine Maximalgeschwindigkeit von 900 km/h ermittelt. Dies schließt auch die Bestimmung der dafür erforderlichen Mindest-Windgeschwindigkeit ein. Weiter wird mit einer Betrachtung über den Einfluss der Flächenbelastung gezeigt, dass damit eine Möglichkeit zur Erhöhung der Zykluszeit sowie der Reduzierung des Lastfaktors besteht.

1. EINLEITUNG

Der dynamische Segelflug ist eine Flugmethode, bei der die für den Flug erforderliche Energie aus einem höhenveränderlichen Horizontalwind gewonnen wird, so dass keine Vortriebskraft erforderlich ist [1, 2]. Horizontalwind-Szenarios, bei denen sich die Windgeschwindigkeit mit der Höhe ändert, werden als Scherwinde oder Windscherungen bezeichnet. Um den dynamischen Segelflug dauerhaft durchführen zu können, ist es erforderlich, dass die Windscherung eine bestimmte Stärke aufweist [3].

Scherwindszenarios gibt es in unterschiedlichen Ausprägungen, die sich über einen moderaten bis größeren Höhenbereich erstrecken können oder nur eine dünne Scherschicht aufweisen. Für das in dieser Arbeit zu behandelnde Problem extrem hoher Geschwindigkeiten eines antriebslosen Fluggerätes sind Horizontalwinde mit einer dünnen Scherschicht von maßgeblicher Bedeutung.

Der genannte Scherwindtyp mit dünner Scherschicht existiert an Berggrücken oder Gebirgskämmen [4 - 6]. Auf der Leeseite trennt hierbei eine dünne Scherschicht den über den Berggrücken wehenden Wind von einem darunter befindlichen Gebiet mit ruhender Luft oder einem Zirkulationsgebiet. Diese Scherwindformation bietet eine Möglichkeit zur Durchführung des dynamischen Segelfluges [5 - 8]. Eine anschauliche Darstellung dazu zeigt Bild 1. Das Segelflugzeug führt hierbei eine oval- bzw. kreisförmige Flugbahn aus. Bei einer solchen geschlossenen Flugbahn wird die dünne Windscherung zweimal durchquert, wobei dies im Steigflug gegen den Wind

erfolgt, während der darauffolgende Sinkflug in Richtung des Windes weist. Die hierbei auftretende, obere Kurve, die im Gebiet des Windes stattfindet und bei der eine Änderung der Flugrichtung von Gegen- zu Rückenwind erfolgt, führt zu einem Energiegewinn aus der bewegten Luft [9]. Dieser Energiegewinn dient zum Ausgleich des Energieverlustes durch den Widerstand und bildet somit die Grundlage für den antriebslosen Flug.

Durch Ausnutzung der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden durch die Scherschicht getrennten Luftmassen ermöglicht es die Flugmethode des Dynamischen Segelfluges, dass ferngesteuerte Modellsegelflugzeuge extrem hohe Geschwindigkeiten erreichen können [5, 10]. Dies hat dazu geführt, dass über die vergangenen Jahre ständig wachsende Geschwindigkeitsrekorde aufgestellt wurden, bis nunmehr ein Wert von 877 km/h im Jahr 2018 erreicht wurde [11].

Im vorliegenden Beitrag wird der dynamische Segelflug von ferngesteuerten Modellsegelflugzeugen im Scherwind hinter Bergkämmen behandelt. Hierfür werden geeignete Modellierungen für die Flugmechanik des Modellsegelflugzeuges im dynamischen Segelflug und für ein Windszenario mit dünner Scherschicht hinter einem Bergkamm entwickelt. Weiter wird ein effizientes Berechnungsverfahren zur Lösung des komplexen Optimierungsproblems verwendet. Damit kann das hochdynamische Flugmanöver, aus dem der dynamische Segelflug an Bergkämmen besteht, behandelt werden und die höchste Geschwindigkeit bestimmt werden, die für ein gegebenes Scherwindszenario erzielt werden kann.

2. MODELLIERUNG VON FLUGDYNAMIK UND WIND

Zur Beschreibung der Bewegung eines antriebslosen Fluggerätes beim dynamischen Segelflug können die Bewegungsgleichungen auf Basis der Massenpunktdynamik verwendet werden. Hierfür gilt mit Bezug zu einem inertialen Referenzsystem (Bild 2)

$$\begin{aligned}\dot{u}_i &= -a_{u1}W/m - a_{u2}A/m \\ \dot{v}_i &= -a_{v1}W/m - a_{v2}A/m \\ \dot{w}_i &= -a_{w1}W/m - a_{w2}A/m + g \\ \dot{x}_i &= u_i \\ \dot{y}_i &= v_i \\ \dot{h} &= -w_i\end{aligned}\quad (1)$$

Die darin zur Abkürzung eingeführten Koeffizienten $a_{u1,2}$, $a_{v1,2}$ und $a_{w1,2}$ betreffen Beziehungen zwischen den aerodynamischen Kräften, Auftrieb A und Widerstand W bzw. deren Komponenten bezüglich des verwendeten Koordinatensystems. Hierfür gilt

$$\begin{aligned}a_{u1} &= \cos \gamma_a \cos \chi_a \\ a_{u2} &= \cos \mu_a \sin \gamma_a \cos \chi_a + \sin \mu_a \sin \chi_a \\ a_{v1} &= \cos \gamma_a \sin \chi_a \\ a_{v2} &= \cos \mu_a \sin \gamma_a \sin \chi_a - \sin \mu_a \cos \chi_a \\ a_{w1} &= -\sin \gamma_a \\ a_{w2} &= \cos \mu_a \cos \gamma_a\end{aligned}\quad (2)$$

Die aerodynamischen Kräfte hängen von der Geschwindigkeit gegenüber der Luft \mathbf{V} ab, während die Bewegung des Segelflugzeuges durch die inertielle Geschwindigkeit $\mathbf{V}_{inert} = (u_i, v_i, w_i)^T$ beschrieben wird. Diese Geschwindigkeitsvektoren sind über den Windgeschwindigkeitsvektor \mathbf{V}_W miteinander verbunden (Bild 2). Hierfür gilt

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{inert} - \mathbf{V}_W \quad (3)$$

Bei geeigneter Wahl des Koordinatensystems relativ zum Wind kann für die Windgeschwindigkeit

$$\mathbf{V}_W = (-V_W, 0, 0)^T \quad (4)$$

gesetzt werden. Damit kann der Geschwindigkeitsvektor gegenüber der Luft in der folgenden Form dargestellt werden

$$\mathbf{V} = (u_i + V_W, v_i, w_i)^T \quad (5a)$$

mit

$$V = \sqrt{(u_i + V_W)^2 + v_i^2 + w_i^2} \quad (5b)$$

Für die in Gl. (2) aufgeführten Bahn- und Azimutwinkel gilt

$$\begin{aligned}\sin \gamma_a &= -w_i/V \\ \tan \chi_a &= v_i/(u_i + V_W)\end{aligned}\quad (6)$$

Der Hängewinkel μ_a ergibt sich aus der Optimierung der Flugbahn, die unten beschrieben wird.

Für die flugmechanische Modellierung des Modellsegelflugzeuges wird Bezug zu existierenden Flugmustern genommen [10]. Hinsichtlich der Widerstandspolaren sind Kompressibilitätseffekte, die bei der zu erreichenden Geschwindigkeit von 900 km/h mit Machzahlen um $M = 0.7$ auftreten können, in der Modellierung berücksichtigt.

Das zu behandelnde Windszenario an Bergrücken ist in Bild 1 dargestellt. Bei derartigen Windszenarios existiert eine dünne Scherschicht [4, 12]. Die Modellierung des Windes und der Scherschicht ist in Bild 3 gezeigt. Die modellierte Scherschicht weist graduelle Übergänge zur ruhenden Luft darunter sowie zu dem Gebiet horizontalen Windes darüber auf, wobei $V_{W\leftrightarrow,Ref}$ die dort herrschende Windgeschwindigkeit ist.

3. OPTIMIERUNGSBETRACHTUNG

Ziel der Optimierung des geschilderten dynamischen Segelfluges an Bergkämmen ist es, die inertielle Maximalgeschwindigkeit zu bestimmen, die mit dieser Flugmethode zu erreichen ist. Hierzu wird die folgende Zielfunktion spezifiziert

$$J(\mathbf{x}) = V_{inert} \quad (7)$$

Das Optimierungsproblem kann dahingehend formuliert werden, dass für die Maximierung von $J(\mathbf{x}) = V_{inert}$ die optimale Steuerung

$$\mathbf{u}^*(t) = [C_A^*(t), \mu_i^*(t)]^T \quad (8)$$

und die optimalen Zustandsgrößen

$$\mathbf{x}^*(t) = [u_i^*(t), v_i^*(t), w_i^*(t), x^*(t), y^*(t), h^*(t)]^T \quad (9)$$

für das durch Gl. (1) gegebene dynamische System

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (10)$$

zu bestimmen sind. Hierbei sind die Periodizitäts-Randbedingungen

$$\mathbf{x}(t_{cyc}) = \mathbf{x}(0) \quad (11)$$

und die Beschränkungsbedingung in den Steuergrößen

$$C_{Lmin} \leq C_L \leq C_{Lmax} \quad (12)$$

zu berücksichtigen.

Zur Lösung des Optimalsteuerungsproblems werden die Zustände und Steuerungen auf dem Zeitgitter \bar{t} diskretisiert. Die Bewegungsgleichungen werden an den Kollokationspunkten mithilfe der Trapezregel approximiert. Die entsprechenden dynamischen Gleichheitsbeschränkungen

$$c(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{t}) = \bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k - \frac{\bar{t}_{k+1} - \bar{t}_k}{2} [f(\bar{x}_{k+1}, \bar{u}_{k+1}) + f(\bar{x}_k, \bar{u}_k)] = \mathbf{0} \quad (13)$$

gelten für die diskretisierten Zustände \bar{x} und Steuerungen \bar{u} an jedem Zeitpunkt des Diskretisierungsgitters. Diese Transkription des Optimalsteuerungsproblems wird automatisiert mithilfe der Optimalsteuerungssoftware FALCON.m [13] durchgeführt. Das resultierende dünnbesetzte, parametrische Optimierungsproblem, welches als Optimierungsvariablen die diskretisierten Zustände und Steuerungen sowie freie Parameter beinhaltet, kann effizient mit maßgeschneiderter Optimierungssoftware gelöst werden, z.B. dem Innere-Punkte-Verfahren IPOPT.

4. ERGEBNISSE

Dynamischer Segelflug mit 900 km/h (Referenzfall)

Ergebnisse über die optimierte Flugbahn des dynamischen Segelfluges zur Erzielung einer maximal möglichen Geschwindigkeit von 900 km/h sind in Bild 4 dargestellt, das die Flugbahn in perspektivischer Sicht wiedergibt. Die Darstellung zeigt die Bahn in ihrer räumlichen Ausdehnung und die Mittelebene der Windschicht, wobei die x -Koordinate parallel zur Windrichtung gewählt ist. Die Flugbahn, deren oberer Teil über der Scherschicht liegt und deren unterer Teil darunter, weist die charakteristischen Merkmale des dynamischen Segelfluges auf, bestehend aus den folgenden 4 Flugphasen:

- Steigflug gegen den Wind (mit Durchqueren der Scherschicht nach oben)
- Obere Kurve mit Änderung der Flugrichtung von Gegen- zu Rückenwind
- Sinkflug mit dem Wind (mit Durchqueren der Scherschicht nach unten)
- Untere Kurve mit Änderung der Flugrichtung von Rücken- zu Gegenwind

Hauptergebnis ist die erzielbare Maximalgeschwindigkeit, die sich aus der Optimierung des dynamischen Segelfluges zu $V_{inert,max} = 902.2$ km/h ergibt. Dieses Ergebnis steht in Bezug zur Windgeschwindigkeit von $V_{W\vec{z},Ref} = 24.0$ m/s, die als Mindestwert der Windgeschwindigkeit für die Erreichung von $V_{inert,max} = 902.2$ km/h erforderlich ist. Weiter ist bemerkenswert, dass $V_{inert,max}$ um ein Vielfaches größer ist als die zugehörige Windgeschwindigkeit $V_{W\vec{z},Ref}$. Dies zeigt sich im Verhältnis der beiden Größen, das einen Wert von $VW\vec{z},Ref_{inert,max}$ aufweist.

Ein weiteres Ergebnis der Optimierung ist der Bahnpunkt, an dem die Maximalgeschwindigkeit $V_{inert,max}$ erreicht wird. Der betreffende Bahnpunkt liegt – wie in Bild 3 gezeigt – oberhalb der Mittelebene der Windschicht. Dies bedeutet, dass der Bahnpunkt der Maximalgeschwindigkeit $V_{inert,max}$ nicht der unterste Punkt der Flugbahn ist, sondern ein Punkt, der sich deutlich darüber im oberen Bereich der Flugbahn befindet.

Die optimierten Zeitverläufe von Höhe und Geschwindigkeit sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt, die zur weiteren Quantifizierung der Ergebnisse über die Optimalflugbahn dienen. Der Bezug der beiden Größen zur Zeit ist so gewählt, dass die Maximalgeschwindigkeit am Ende des Zyklus auftritt.

Bei der Höhe h (Bild 5) zeigt sich ein schwingungsförmiges Verhalten um die Mittelebene der Windschicht, das eine annähernd symmetrische Form aufweist. Mit Bezug zu Bild 3 wird deutlich, dass die Höhe sowohl im oberen als auch im unteren Bereich Werte annimmt, die außerhalb der Windschicht liegen. Dies lässt sich dahingehend interpretieren, dass die Differenz zwischen ruhender Luft und Wind energetisch voll genutzt wird.

Die Geschwindigkeit V_{inert} (Bild 6) weist Werte auf, die durchweg auf einem hohen Niveau sind. Außerdem zeigt V_{inert} ebenfalls ein schwingungsförmiges Verhalten, das jedoch weniger symmetrisch ausgeprägt ist als das der Höhe. In Bild 6 ist der V_{inert} -Wert kenntlich gemacht, der im untersten Bahnpunkt auftritt. Der Vergleich mit der Maximalgeschwindigkeit $V_{inert,max}$ zeigt, dass dieser V_{inert} -Wert deutlich kleiner ist.

Die Ergebnisse in den Bildern 5 und 6 beinhalten als Teilergebnis auch die optimale Zykluszeit, die sich zu $t_{cyc} = 1.36$ s ergibt. Dieser Wert besagt, dass der dynamische Segelflug mit der Maximalgeschwindigkeit von $V_{inert,max} = 902.2$ km/h ein Flugmodus mit sehr kurzer Zykluszeit ist. Der Betrag von $t_{cyc} = 1.36$ s ist vergleichbar mit Ergebnissen aus Untersuchungen über den dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich und ausgeführten Flügen mit existierenden Modellsegelflugzeugen [5, 10, 14]. Kleine Zykluszeiten dieser Größenordnung gelten als kritisch. Dies beruht darauf, dass Zykluszeiten von etwa 2 s oder kleiner als schwierig für die Flugdurchführung in der Praxis angesehen werden [14].

Die optimierten Verläufe der Steuergrößen sind in den Bildern 7 und 8 dargestellt. Dies betrifft den Auftriebsbeiwert und den Hängewinkel.

Der Auftriebsbeiwert zeigt ein schwingungsförmiges Verhalten. Die Werte liegen innerhalb des aerodynamisch möglichen Bereichs, so dass die Beschränkungen gemäß Gl. (12) nicht wirksam werden. Die größten Werte treten im unteren bzw. oberen Höhenbereich auf (Bild 5).

Der Hängewinkel zeigt ebenfalls ein schwingungsförmiges Verhalten. Der Wertebereich des Hängewinkels, dessen Mittelwert betragsmäßig bei etwa 1.5 rad liegt, macht deutlich, dass der Flug mit einer hohen Schräglage erfolgt. Hierbei zeigt sich mit Bezug zum Höhenverlauf (Bild 5), dass die Schräglage in der unteren Kurve geringer ist als in der oberen Kurve.

Eine wichtige Kenngröße des dynamischen Segelfluges im Hochgeschwindigkeitsbereich ist der Lastfaktor. Die im vorliegenden Fall auftretenden Lastfaktoren sind in Bild 9 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass der Lastfaktor in der Spitze Werte erreicht, die über $n = 100$ liegen.

Große Lastfaktorwerte sind ein kennzeichnendes Merkmal des dynamischen Segelfluges im Hochgeschwindigkeitsbereich [5].

Bedeutung der Flächenbelastung für den dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich

Die Flächenbelastung m/S kann als eine Einflussgröße angesehen werden, die von maßgeblicher Bedeutung für den dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich im Hinblick auf Flugeleistungen, Flugsteuerung und Belastungen ist. Dies wird im Folgenden an dem Einfluss von m/S auf Kenngrößen dargelegt, die in diesem Zusammenhang wichtig sind und spezifische Abhängigkeiten aufweisen. Ziel hierbei ist es insbesondere herauszuarbeiten, welche positiven Effekte zur Verbesserung der Flugdurchführung möglich sind.

Als Ausgangspunkt der Betrachtung wird der Einfluss der Flächenbelastung m/S auf Zustands- und Steuergrößen behandelt, um zunächst auf anschauliche Weise die Effekte von m/S zu beschreiben und charakteristische Veränderungen in diesen Größen darzulegen. Hierzu werden die Fälle einer erhöhten und einer verringerten Flächenbelastung betrachtet und dem obigen Referenzfall mit $m/S = 31.29 \text{ kg/m}^2$ gegenübergestellt. Die Windgeschwindigkeit des Referenzfalles ($V_{W^*,\text{Ref}} = 24.0 \text{ m/s}$) wird als maßgebliche Bezugsgröße für die Gegenüberstellung zugrunde gelegt.

Der Einfluss von m/S auf die Flugbahn ist in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die grundsätzliche Form im Sinne einer geschlossenen, ovalförmigen Flugbahn weiter besteht. Jedoch führt die Reduzierung von m/S gegenüber dem Referenzwert $(m/S)_{\text{Ref}}$ zu einer Verkleinerung der räumlichen Ausdehnung der Bahn, während bei einer Vergrößerung von m/S das Gegenteil eintritt. Dies betrifft insbesondere die Ausdehnung der Bahn in longitudinaler und in lateraler Richtung.

Gegenüber den großen Änderungen in der Bahnabmessungen sind die Änderungen in der erzielbaren Maximalgeschwindigkeit vergleichsweise gering, da $V_{\text{inert,max}} = 887.8 \text{ km/h}$ im Fall $m/S = 0.5(m/S)_{\text{Ref}}$ gilt und $V_{\text{inert,max}} = 913.0 \text{ km/h}$ im Fall $m/S = 2.0(m/S)_{\text{Ref}}$. Dies entspricht einer Reduzierung von 2 % bzw. eine Erhöhung von 1 % gegenüber dem Referenzfall $(m/S)_{\text{Ref}}$.

Der Einfluss der Flächenbelastung auf die optimalen Verläufe von Höhe und Geschwindigkeit ist in den Bildern 12 und 13 dargestellt. Als charakteristische Auswirkungen der Änderungen von m/S zeigt sich, dass die Zykluszeit mit einer Zunahme von m/S deutlich ansteigt. Demgegenüber bleibt die Form der Kurvenverläufe ähnlich. Kleinere Unterschiede im Höhenverlauf äußern sich darin, dass die Auslenkungen nach oben und unten mit Zunahme von m/S leicht anwachsen. Geringfügige Unterschiede bestehen auch bei der Geschwindigkeit, wo es zu einer geringfügigen Anhebung des Geschwindigkeitsniveaus mit Zunahme von m/S kommt.

Bei den Steuergrößen, deren optimierte Verläufe in den Bildern 14 und 15 dargestellt sind, zeigen sich analoge

Auswirkungen infolge einer Änderung von m/S . Sowohl der Auftriebsbeiwert als auch der Hängewinkel weisen Ähnlichkeiten in den Formen der jeweiligen Kurvenverläufe auf. Kleinere Änderungen beim Auftriebsbeiwert betreffen die Auslenkungen in den Kurvenverläufen, die mit einer Zunahme von m/S geringer werden. Entsprechendes gilt auch hinsichtlich des Hängewinkels, bei dem die Auslenkungen in den Kurvenverläufen ebenfalls mit einer Zunahme von m/S zurückgehen.

In einer zusammenfassenden Betrachtung wird nachfolgend der Einfluss der Flächenbelastung m/S auf den dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich dargelegt. Ziel ist es hierbei, die maßgeblichen Auswirkungen von m/S herauszuarbeiten und positiven Effekte zur Verbesserung der Flugdurchführung aufzuzeigen.

Ein Faktor, der eine große Bedeutung für die Flugdurchführung in der Praxis hat, ist die Zykluszeit t_{cyc} . Dies beruht darauf, dass die Zykluszeiten, die beim dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich möglich sind, extrem kleine Werte annehmen können, die als kritisch eingestuft werden. Demnach werden Zykluszeiten von etwa 2 s oder kleiner als schwierig für die Flugdurchführung in der Praxis angesehen. Vor diesem Hintergrund ist jede Möglichkeit von Interesse, die ohne Leistungseinbuße zu einer Erhöhung der Zykluszeit führt.

Wie in den Ergebnissen zu den Zustands- und Steuergrößen (Bilder 12 bis 15) ersichtlich, ändert sich die optimale Zykluszeit deutlich mit der Flächenbelastung m/S . Ergebnisse aus einer eingehenderen Untersuchung dieses Effektes sind in Bild 16 dargestellt, das die Zykluszeit in Abhängigkeit von der Flächenbelastung zeigt. Daraus geht hervor, dass t_{cyc} kontinuierlich mit m/S zunimmt. Dies bedeutet im vorliegenden Fall, dass ab einer Flächenbelastung von etwa $m/S = 1.5(m/S)_{\text{Ref}}$ die Zykluszeiten über dem kritischen Bereich (etwa 2 s und kleiner) liegen.

Ein weiterer Aspekt, der für den dynamischen Segelflug im Hochgeschwindigkeitsbereich von Bedeutung ist, betrifft den Lastfaktor. Zur Verdeutlichung dieses Effektes sind in Bild 17 die Lastfaktor-Verläufe dargestellt, die sich für die obigen drei m/S -Fälle ergeben. Hauptergebnis ist der große Einfluss von m/S , der sich in einer starken Abnahme des Lastfaktors mit der Zunahme von m/S zeigt. Hierbei ist die Abnahme des Niveaus von m/S in etwa proportional zu m/S . Ein weiterer Effekt besteht darin, dass die Ausschläge in den Lastfaktor-Kurvenverläufen mit Zunahme von m/S deutlich zurückgehen.

Für die Bewertung der beschriebenen positiven Auswirkungen der Flächenbelastung m/S ist der Einfluss von m/S auf die erzielbare Maximalgeschwindigkeit $V_{\text{inert,max}}$ maßgeblich. Hierzu ist in Bild 18 der Einfluss von m/S auf $V_{\text{inert,max}}$ dargestellt. Daraus geht hervor, dass $V_{\text{inert,max}}$ annähernd konstant ist, wobei eine geringfügige Zunahme mit m/S vorliegt. Dies bedeutet, dass die beschriebenen positiven Auswirkungen der Flächenbelastung auf Zykluszeit und Lastfaktor ohne Leistungseinbuße bzw. mit einem kleinen Gewinn hinsichtlich $V_{\text{inert,max}}$ genutzt werden können.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Idrac, P., 1932: Experimentelle Untersuchungen über den Segelflug mitten im Fluggebiet großer segelnder Vögel (Geier, Albatros usw.) – Ihre Anwendung auf den Segelflug des Menschen. München und Berlin: Verlag von R. Oldenbourg.
- [2] Cone, C. D., Jr. A Mathematical Analysis of the Dynamic Soaring Flight of the Albatross with Ecological Interpretations. Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, Virginia, Special Scientific Report-No. 50, 1964.
- [3] Sachs, G., 2005: Minimum shear wind strength required for dynamic soaring of albatrosses. Ibis 147, S. 1-10.
- [4] Bird, J.J., Langelaan, J.W., Montella, C., Spletzer, J., and Grenstedt, J.: Closing the Loop in Dynamic Soaring. AIAA SciTech, 13-17 January 2014, National Harbor, Maryland, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2014-0263, 2014.
- [5] Richardson, P.L., 2012: High-Speed Dynamic Soaring. R/C Soaring Digest, Vol. 29, Nr. 4, S. 36-49.
- [6] M. Boslough: Autonomous Dynamic Soaring. 2017 IEEE Aerospace Conference, 4 - 11 März 2017, Big Sky, MT, USA, IEEE, S. 1-20, 2017.
- [7] Wurts, J.: Dynamic Soaring. S&E Modeler Magazine, Vol. 3-5, August/September, pp. 52-61, 1998.
- [8] Sachs, G., and da Costa, O.: Optimization of Dynamic Soaring at Ridges. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit 11 - 14 August 2003, Austin, Texas, AIAA 2003-5303, 2003.
- [9] Sachs, G., Mayrhofer, M.: Shear Wind Strength Required for Dynamic Soaring at Ridges, Technical Soaring, Vol. 25, Nr. 4, S. 209-215, 2001.
- [10] Lisenby; S., 2017: Dynamic Soaring, Big Techday 10, June 2nd, 2017, Technology Consulting, München.
- [11] B²: In the Air. R/C Soaring Digest, Band 35, Nr. 7, S. 3, 2018
- [12] Bencatel, R., Sousa, J., Faied, M., and Girard, A.: Shear Wind Estimation. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 08 - 11 August 2011, Portland, Oregon, AIAA 2011-6224, pp. 1-8, 2011.
- [13] Rieck, M., Bittner, M., Grüter, B., and Diepolder, J., 2016: FALCON.m – User Guide, Institute of Flight System Dynamics, Technische Universität München.
- [14] Richardson, P.L.: High-Speed Robotic Albatross: Unmanned Aerial Vehicle powered by dynamic soaring. R/C Soaring Digest, Vol. 29, No. 6, pp. 4-18, 2012.

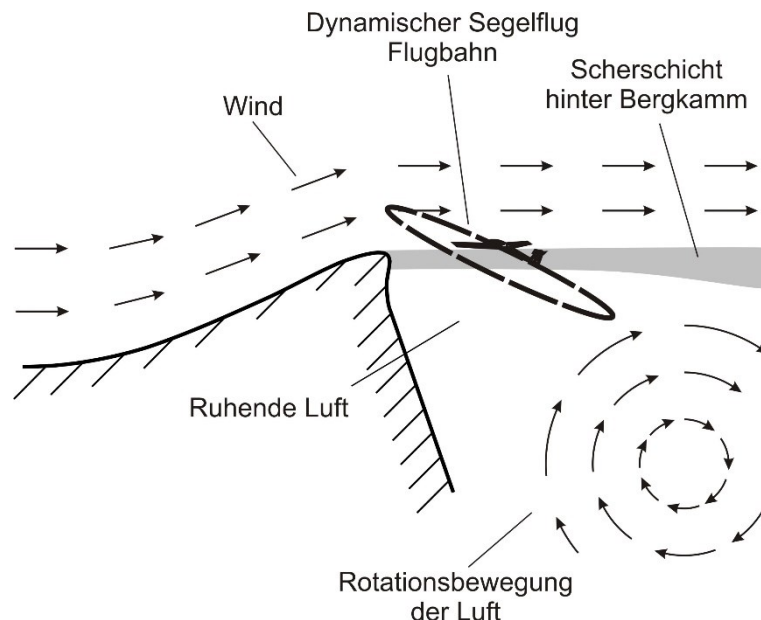


BILD 1 Dynamischer Segelflug im Windgebiet mit einer Scherschicht hinter einem Bergkamm

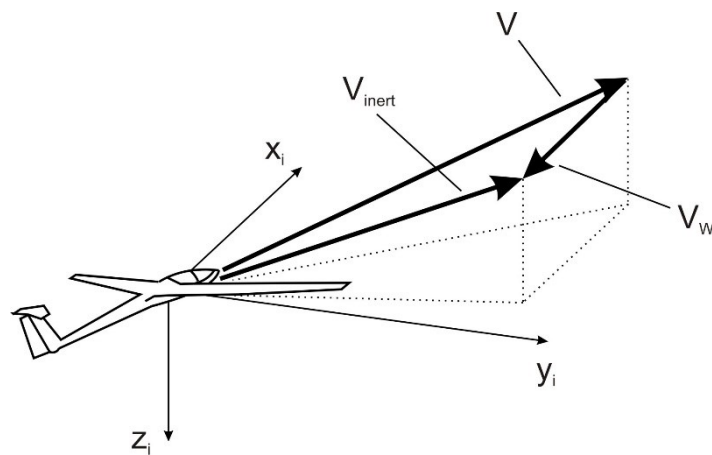


BILD 2 Geschwindigkeitsvektoren und inertiales Koordinatensystem

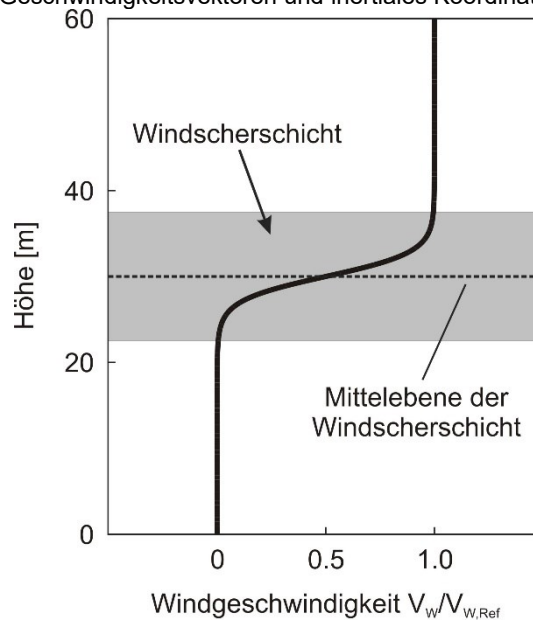


BILD 3 Modellierung von Wind und Windscherschicht

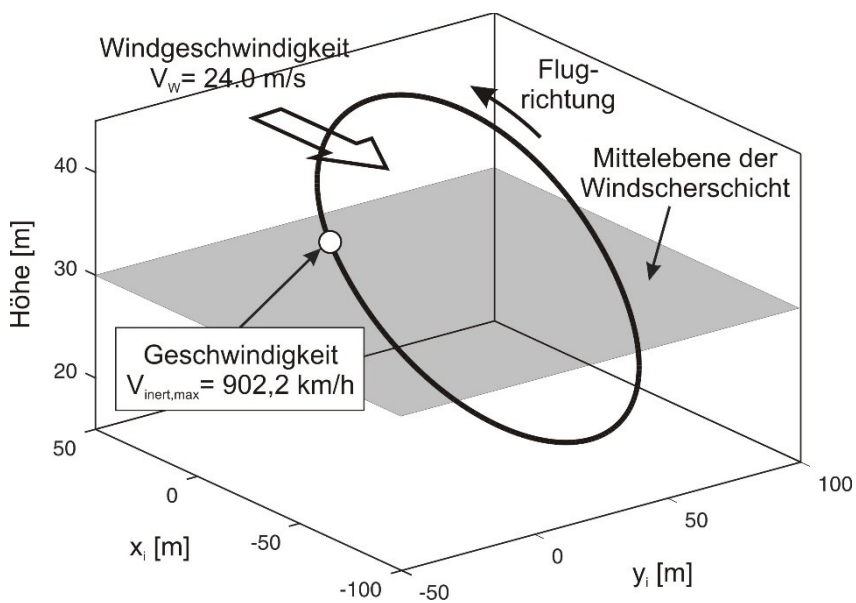


BILD 4 Optimierte Flugbahn mit Maximalgeschwindigkeit von 902,2 km/h

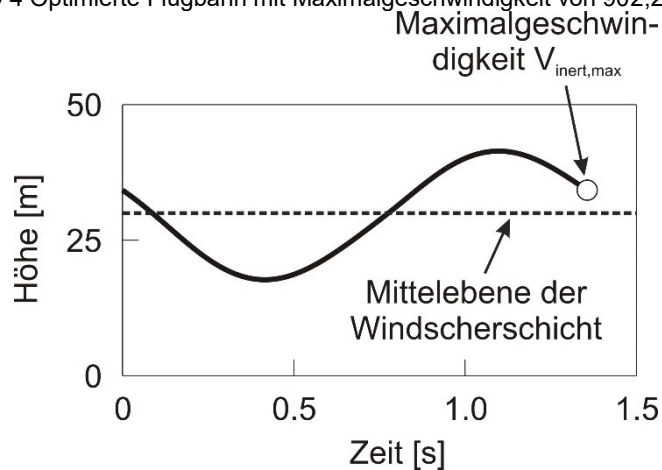


BILD 5 Optimaler Verlauf der Höhe

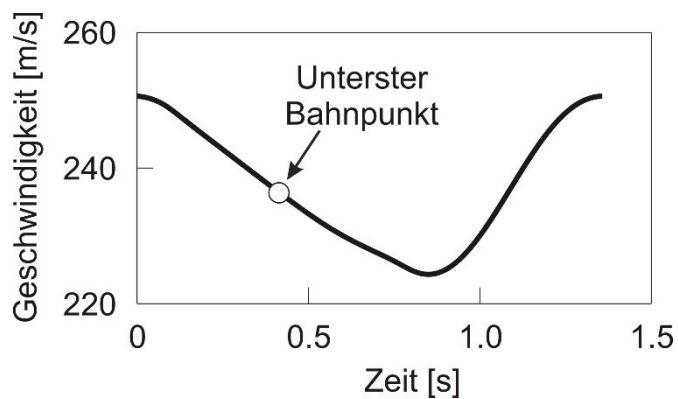


BILD 6 Optimaler Verlauf der Inertialgeschwindigkeit

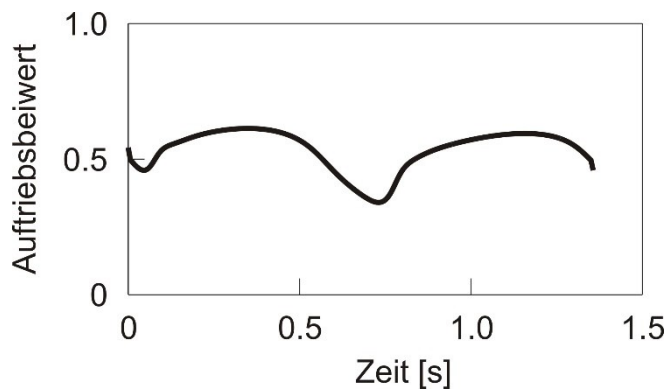


Bild 7 Optimaler Verlauf des Auftriebsbeiwertes

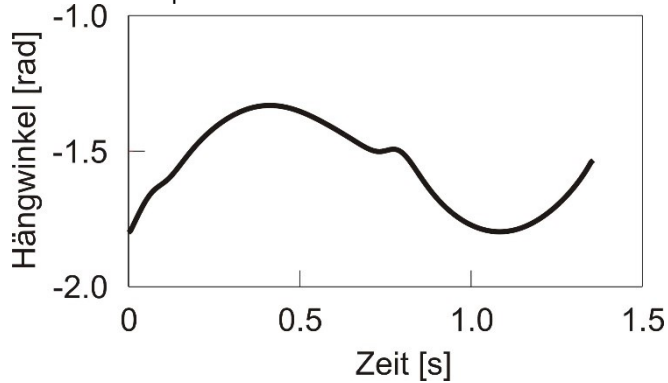


BILD 8 Optimaler Verlauf des Hängewinkels

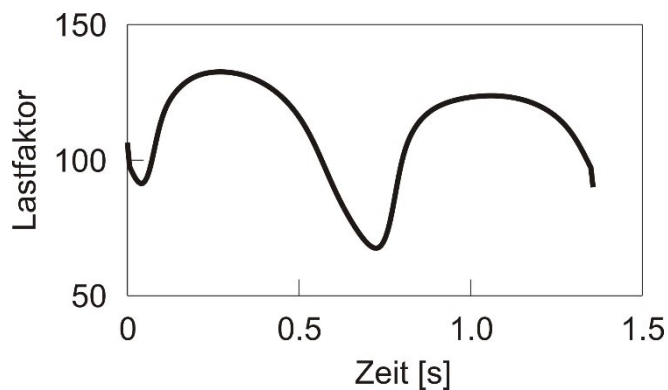


BILD 9 Verlauf Lastfaktors

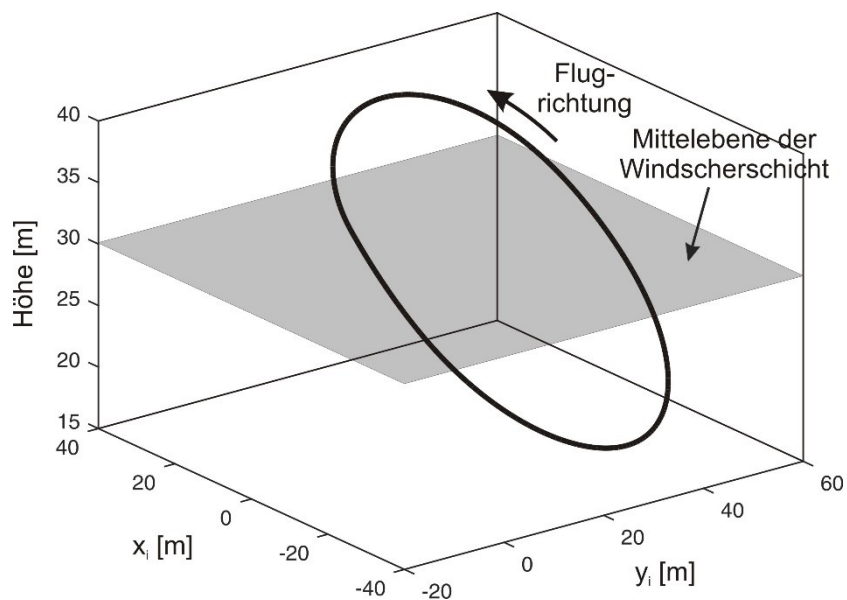


BILD 10 Optimierte Flugbahn für den Fall $m/S = 0.5(m/S)_{Ref}$

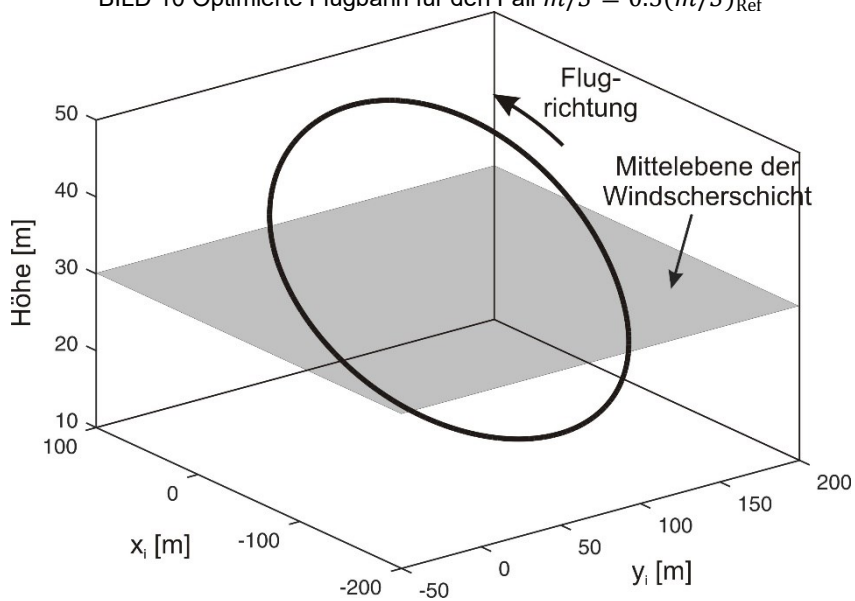


BILD 11 Optimierte Flugbahn für den Fall $m/S = 2.0(m/S)_{Ref}$

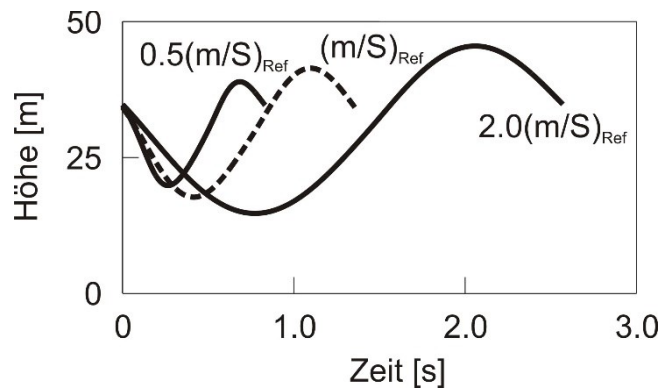


BILD 12 Einfluss der Flächenbelastung auf den optimalen Verlauf der Höhe

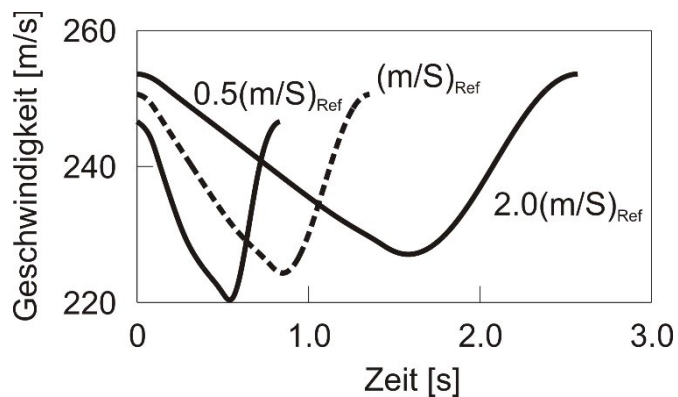


BILD 13 Einfluss der Flächenbelastung auf den optimalen Verlauf der Geschwindigkeit

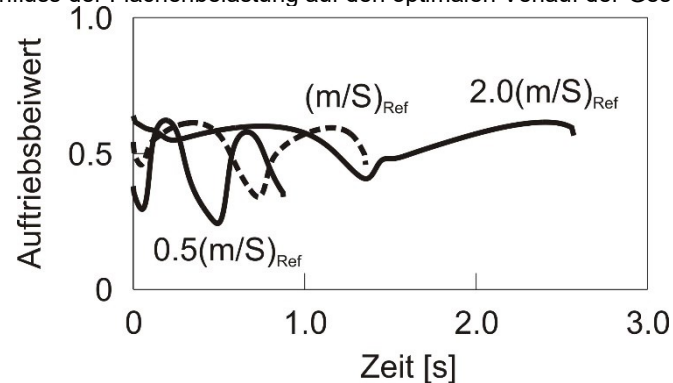


BILD 14 Einfluss der Flächenbelastung auf den optimalen Verlauf des Auftriebsbeiwertes

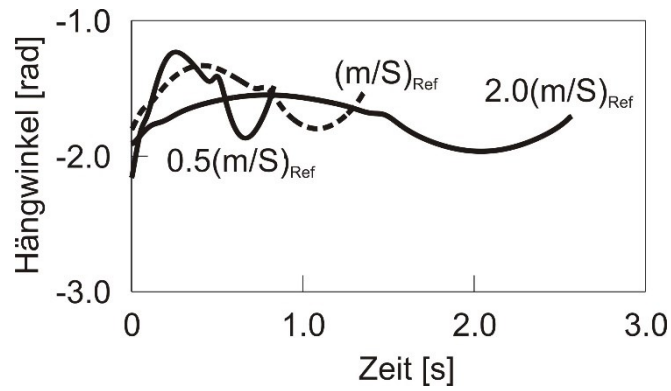


BILD 15 Einfluss der Flächenbelastung auf den optimalen Verlauf des Hängewinkels

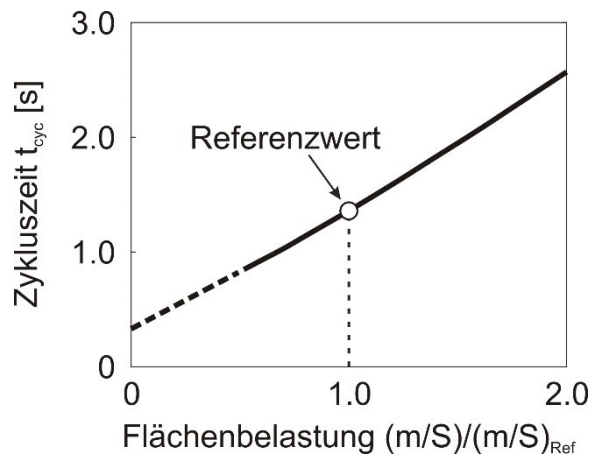


BILD 16 Einfluss der Flächenbelastung auf die optimale Zykluszeit

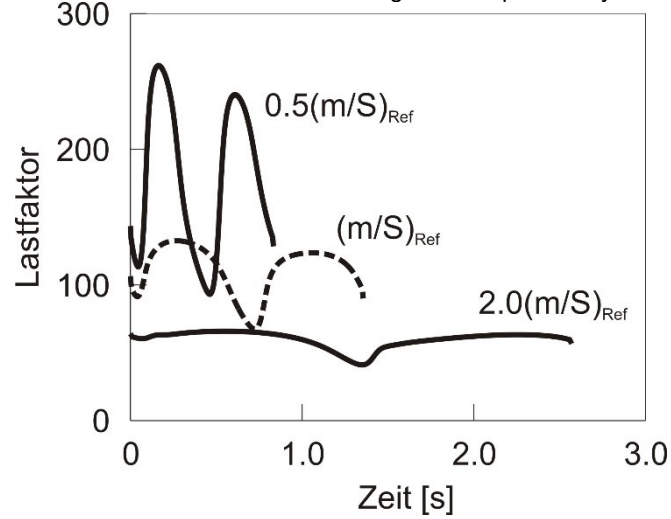


BILD 17 Einfluss der Flächenbelastung auf den Verlauf des Lastfaktors

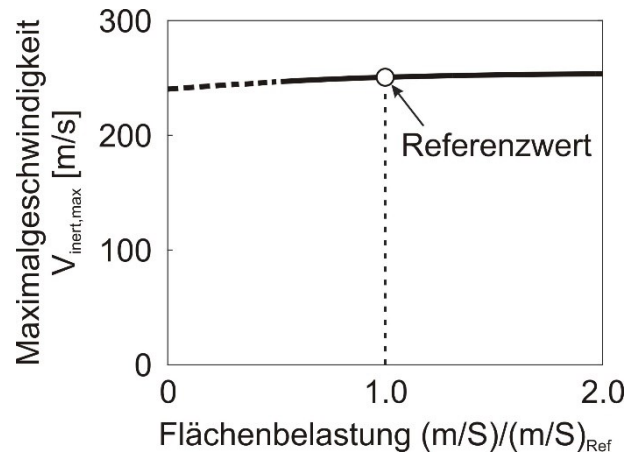


BILD 18 Einfluss der Flächenbelastung auf die Maximalgeschwindigkeit