

KONSTRUKTION, BAU, FLUGERPROBUNG UND AERODYNAMISCHE UNTERSUCHUNG EINES SPHÄRISCHEN KLEINLUFTSCHIFFES

G. Traut und A. Meyer
Hochschule Bremen
Institut für Aerospace-Technologie
Flughafenallee 10
28199 Bremen

Auf Grundlage der Teilnahme an einer Indoor RC Airship Regatta im Rahmen des Workshops der DGLR Fachabteilung Flugsysteme Leichter als Luft im Aeronauticum Nordholz sollte ein kugelförmiges Luftschiff konstruiert und gebaut werden. Die Kugelform des hier vorgestellten RC Kleinluftschiffes „Kugelblitz“ ergab sich aus Gründen des optimalen Volumen-Oberflächenverhältnisses der Kugel und der besseren Manövrierfähigkeit gegenüber konventionellen Luftschiffen. Bei einem Luftschiffrennen werden die Vor- und Nachteile der verschiedensten Konzepte und Konfigurationen direkt sichtbar. Für die Vergleichbarkeit gab es eine Gewichtsvorgabe von 500 Gramm +/- 10 Gramm.

Im Verlauf der Arbeiten an dem Luftschiff und der Teilnahme an weiteren Rennen wurden die erarbeiteten Erkenntnisse in mehreren Varianten des Kugelblitzes umgesetzt. Besondere Aufmerksamkeit liegt hierbei auf der Widerstandsreduzierung von sphärischen Luftschiffen.

1. KONSTRUKTION

1.1. Hülle

Um 500 Gramm Masse in die Luft zu bringen, benötigt man ca. einen halben Kubikmeter Helium. Daraus ergibt sich eine Kugel mit einem Durchmesser von etwa einem Meter. Bei der Auswahl des Hüllenmaterials waren vor allem das Gewicht und die Kugelform ausschlaggebend. Die Wahl fiel daher auf einen großen Luftballon. Da das Luftschiff für den Indoor-Betrieb ausgelegt ist musste keine Rücksicht auf Witterungsbeständigkeit genommen werden. Weitere Vorteile des Luftballons sind die geringen Kosten, die schnelle und einfache Wiederbeschaffung und der variable Durchmesser um eine Anpassung an Umgebungstemperatur und Nutzlast zu ermöglichen. Zur Trimmung müssen dadurch auch keine Ballonetts eingesetzt werden und das das Traggas Helium wird auch nicht verunreinigt. Da der Luftballon sich nicht als tragendes Element eignet ist eine starre Struktur für den Anbau der Antriebseinheiten und zur Unterbringung der RC-Einheit sowie der Nutzlast unumgänglich. Die Luftballon-Hülle ist bei allen drei Generationen des Kugelblitzes beibehalten worden.

1.2. Struktur

Die Anforderungen an die Struktur sind zum einen ein geringes Gewicht und zum anderen die Aufnahme der eingeleiteten Antriebskräfte und das Tragen der Nutzlast.

Bei den zweistrahligten Varianten Kugelblitz I und II sollen die Antriebseinheiten in der Äquatorebene angebracht sein um Nickmomente zu vermeiden. Die RC-Einheit mit den Akkus soll möglichst tief angeordnet sein um ein stabilisierendes Moment, wie ein Kiel zu erreichen. Die Grundstruktur ist eine Ringkonstruktion aus leichten und stabilen Karbonhalbzügen bestehend aus einem doppelten Äquatorring und einem einfachen Halbring von der Äquatorebene zum Boden. Die doppelte Ausführung des Äquatorrings nimmt das Moment der seitlich abstehenden Triebwerke auf. Diese Ringe müssen trennbar ausgeführt werden. Die im Umfang variable Trennstelle insbesondere die des Äquatorrings sorgt für kleinere Bauteile für den Transport des Luftschiffs und für den strammen Sitz des Äquatorrings am Ballon auch bei Veränderungen der Umgebungsbedingungen oder der Nutzlast.

Bei der vierstrahligen Variante Kugelblitz III sind die Antriebseinheiten in X-Form so angeordnet, dass sie auf einen hinter dem Luftschiff liegenden Punkt fokussieren. Das erfordert eine Neukonstruktion der Struktur. Sie besteht ebenfalls aus je zwei Halbringen, die sich unter 90° kreuzen und werden unter einem Winkel von 45° zur Hochachse um den Ballon gelegt. An Bug und Heck werden die Halbringe ebenfalls trennbar und umfangsvariabel zusammengeführt. Die Antriebe werden um 20° bis 30° von der Hochachse aus nach achtern geneigt. Um das Gewicht der Antriebe, die nicht mehr auf einer Linie mit dem Scherpunkt liegen, zu kompensieren wandert die RC-Einheit mit samt Akkus vom Boden zum Bug.

1.3. Antrieb

Da bei Kugelluftschiffen sämtliche Ruder wegfallen hat der Antrieb die Aufgabe, neben dem Vortrieb, das Luftschiff zu steuern. Dazu müssen die zweistrahligten Varianten I und II Schwenktriebwerke erhalten, um eine Vertikalbewegung zu ermöglichen. Die Drehung um die Hochachse erfolgt über differenzierbaren Schub der beiden Propeller. Um die Manövrierfähigkeit noch zu steigern, kann der Schub umgesteuert werden.

Nach Anlaufschwierigkeiten mit den umsteuerbaren Reglern ist für den Kugelblitz II eine Verstellpropellermechanik konstruiert worden. Sie ermöglicht eine Schubumkehr bei gleich bleibender Drehrichtung der Motoren und reagiert schneller auf Steuerbefehle. Bei der Konstruktion der Verstellpropellermechanik standen das Gewicht und die Baugröße im Vordergrund. Daher wurde auf Kaufteile aus dem Hubschraubermodellbau und nur wenige Fräs- und Drehteile zurückgegriffen.

Beim Kugelblitz III ist die Steuerung etwas aufwendiger und dynamischer. Durch die vier starren Propeller in geneigter Anordnung wird nur über die Schubvektoren manövriert. Dies erfordert eine Differenzierung des Schubes über die Hochachse für die Steuerung der Horizontalbewegung und über die Querachse für die Vertikalbewegung.

Zur Auslegung der benötigten Motorleistung wird zuerst der Widerstand errechnet. Bei der Kugel ist der C_W -Wert stark abhängig von der Reynoldszahl. Diese wiederum ist abhängig von der Geschwindigkeit der anströmenden Luft. Bild 1. zeigt den C_W -Wert der Kugel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl.

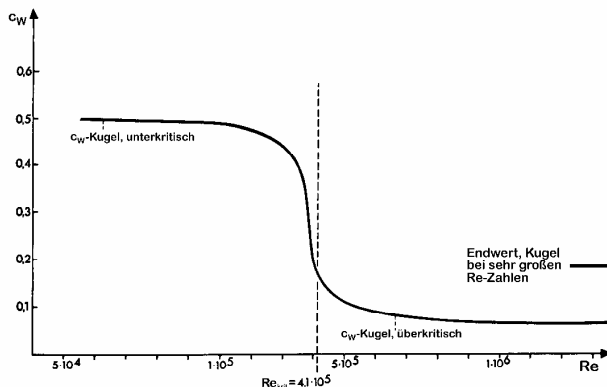


BILD 1. C_W -Wert der Kugel in Abhängigkeit der Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist wie folgt definiert:

$$Re = \frac{V \cdot D_{Kugel}}{\nu} \quad (1)$$

Darin ist V die kinematische Zähigkeit der Luft. Diese beträgt in Meereshöhe $14,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. D ist der Durchmesser der Kugel. Wie in Bild 1.3 abzulesen, liegt die kritische Reynoldszahl im Bereich von $3 \cdot 10^5$ bis $4,5 \cdot 10^5$. Diese wird bei der idealen Kugel mit 6,10 m Durchmesser bei ca. 0,85 m/s erreicht. Das heißt, dass der C_W -Wert beim Unterschreiten dieser Geschwindigkeit schlagartig auf bis zu 0,5 ansteigt. Die Kugelblitz Luftschiffe befinden sich im unterkritischen Bereich. Zusammen mit den parametrierbaren Größen ergibt sich für den Flugbetrieb ein C_W -Wert von etwa 0,5. Damit lässt sich der resultierende Widerstand (W) berechnen. Dabei ist S die Querschnittsfläche der Kugel plus einer parametrierbaren Fläche (α) resultierend aus den Anbauteilen.

$$W = \frac{\rho}{2} V_A^2 C_W (S + \alpha) \quad (2)$$

Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 0,8 m/s ergibt sich ein Widerstand von ca. 0,2 N

Die Auswahl der Motoren fällt damit auf kleine, leichte und drehmomentstarke Motoren. Bürstenlose Motoren in Außenläuferkonfiguration bieten genau die Vorteile die gefordert sind. Zum einen sind sie durch den wegfallenden Bürstenapparat leichter als herkömmliche Gleichstrombürstenmotoren. Sie sind drehmomentstark

durch ihren großen Durchmesser. Der Vorteil eines hohen Drehmoments liegt darin, große Propeller ohne Getriebe im Direktantrieb einsetzen zu können. Zum anderen bauen die Motoren sehr flach, was vorteilhaft für den Einsatz in einem Schwenktriebwerk ist. Zum anderen induzieren bürstenlose Motoren auch nicht so viele Interferenzen, die die Empfangsanlage stören können.

2. BAU

2.1. Hülle

Da die Hülle aus einem handelsüblichen großen Luftballon besteht, war die Beschaffung recht einfach. Der einzige Nachteil ist die geringe Reißfestigkeit des Latexmaterials. Daher muss bei allen anliegenden Bauteilen auf eine sehr glatte Oberfläche geachtet werden. Um die Hülle an der Struktur zu befestigen, wird beim Kugelblitz I und II der Einfüllstutzen durch ein Loch in der Bodenplatte geführt und mit einer großen Klammer abgedichtet. Zur Sicherung des Ballons in der nach oben hin offenen Struktur wird eine Drachenschnur quer über den Ballon gelegt und an den Seitenteilen befestigt. Beim Kugelblitz III umschließt die Struktur die Hülle vollständig, so dass keine weiteren Sicherungen erforderlich sind.

2.2. Struktur

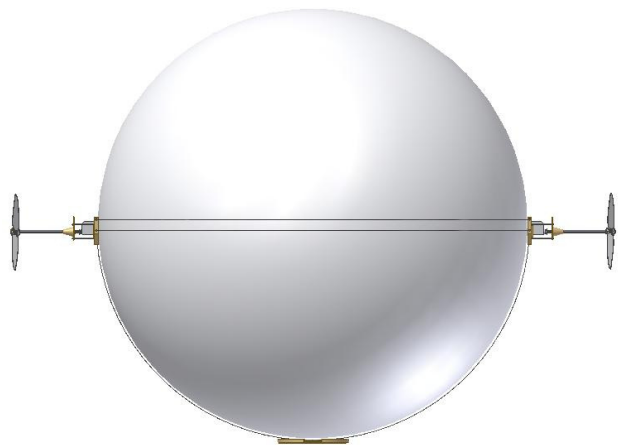


BILD 2. Kugelblitz I

Die tragende Struktur der Luftschiffe Kugelblitz I und II ist identisch. Sie besteht aus einer Bodenplatte, den zwei Seitenteilen zur Aufnahme der Schwenktriebwerke und den verbindenden 2 mm Kohlenstoffstangen. Die Bodenplatte dient zur Aufnahme der RC-Einheit, des Akkus sowie als Steckbefestigung des unteren Halbrings. Die Platte besteht aus einem Verbund aus Balsa und leichtem Pappelsperholz. Weiterhin ist sie mit zahlreichen Bohrungen zur Gewichtsreduktion versehen. Die RC-Komponenten werden an aufgeklebten Klettverschlussbändern an der Bodengruppe befestigt. Der Äquatorring besteht aus 2 parallelen Ringen, die an zwei Stellen getrennt werden können. An dieser Trennstelle besteht nun die Möglichkeit gleichmäßig den Umfang zu ändern. Die Einstellung des Umfangs erfolgt über Stellringe. Sie stützen sich an kleinen Gleitschuhen aus Karbonrohren ab, die die überstehenden Enden der

Halbringe dem Äquatorradius angleichen. Beim Biegen der Karbonstangen ist auf große Radien zu achten, da sie sehr knickempfindlich sind. Die Seitenteile sowie die Antriebe selbst sollten leicht sein, um den Schwerpunkt niedrig zu halten. Sie sind daher auch wieder ein Verbund aus Balsa und Pappelsper Holz, wie es schon bei der Grundplatte verwendet worden ist. Beim Kugelblitz III kommen ebenfalls Halbringe aus 2 mm Karbonstangen zum Einsatz. Zwei Kreuze mit je vier Stellschrauben verbinden die vier Halbringe an Bug und Heck miteinander. Die Stellschrauben ermöglichen die notwendige Variation des Umfangs. Die beiden Kreuze aus Sperrholz bestehen aus je zwei geschlitzten Teilen, die ineinander geschoben und miteinander verleimt sind. Auch hier ist auf abgerundete Kanten und eine splitterfreie Oberfläche aller Teile zu achten, damit die Hülle keinen Schaden nimmt. Die RC-Einheit wird an aufgeklebten Klettverschlussbändern auf einem dreieckigen Sperrholzbrett befestigt, das mit Drachenschnur oben am Bug-Kreuz und unten an den Ringen befestigt wird. Die Position des voll bestückten RC-Bretts ist für die Schwerpunktlage entscheidend und kann durch die Drachenschnur sehr leicht eingestellt werden.

2.3. Antrieb

Die Konfiguration der Antriebseinheiten ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal der drei Generationen des Kugelblitzes. Doch weisen sie auch Gemeinsamkeiten auf. Bei allen drei Luftschiffen sitzt der innen liegende Stator der Motoren direkt auf einem abgewinkelten Karbonrohr. Alle Generationen werden mit 7"x3.5" Luftschrauben angetrieben. Diese sind allerdings bei der Variante II um die Verstellmechanik modifiziert worden.

2.3.1. Motor

Um die Anforderungen zu erfüllen, kamen bürstenlose Außenläufer-Motoren mit Permanentmagneten aus CD-ROM Laufwerken zum Einsatz. Diese mussten allerdings noch in ihrer Leistung gesteigert werden. Dies gelang durch das Einsetzen neuer Neodym-Magneten und einer neuen Bewicklung des Stators mit 0,4 mm Draht bei 13 Windungen. Dieser Motor mit der Bezeichnung **GT 200-50-13-0,4** hat folgende Technische Daten:

- Statordurchmesser: 20 mm
- Statorlänge: 5 mm
- Drahtstärke: 0,425 mm
- Windungszahl: 13
- Statorpolanzahl: 6-polig
- Magnetpolzahl: 12
- Stromaufnahme: max ca. 5,5 A
- Spannung: 7,4 V-11,1 V
- Wellendurchmesser: 3 mm
- Kugellager: 2
- Gewicht: 17 g

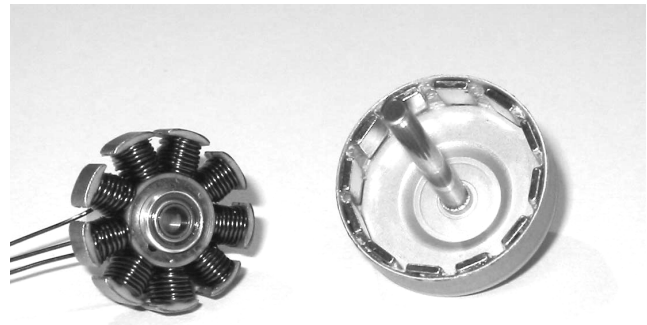


BILD 3. Modifizierter CD-ROM Motor GT 200-50-13-0,4

Beim Kugelblitz I wurden zur Ansteuerung Regler der Firma Schulze Elektronik gewählt, um eine Manövrierbarkeit sowohl vorwärts als auch rückwärts zu gewährleisten. Diese sind derzeit die einzigen in dieser kleinen Baugröße am Markt mit Drehrichtungsumkehr. Der Drehzahlsteller ist durch folgende technischen Daten gekennzeichnet:

future-9.12ek:

- Spannung: 6-9 Ni-Cd bzw. Ni-MH Zellen
bzw. 2-3 Lithiumzellen.
- BEC: 5 V / 2 A BEC System (stabilisiert auf 5 V, erst ab 5,2...6 V Eingangsspannung, abhängig vom Servostrom).
Unterspannungsabschaltung bei etwa 58% der Ansteckspannung oder min. 4,8 Volt bzw. 3,5 Volt (einstellbar).
- Strom: 12 A max.

Die Motoren sind bei allen drei Generationen des Kugelblitzes beibehalten worden. Die umsteuerbaren Regler sind bei den Nachfolgermodellen Kugelblitz II und III durch **YGE 8A** Drehzahlsteller ohne Richtungsumkehr ausgetauscht worden. Die Anschlussbelegung für den vierstrahligen Kugelblitz sieht dann wie folgt aus:

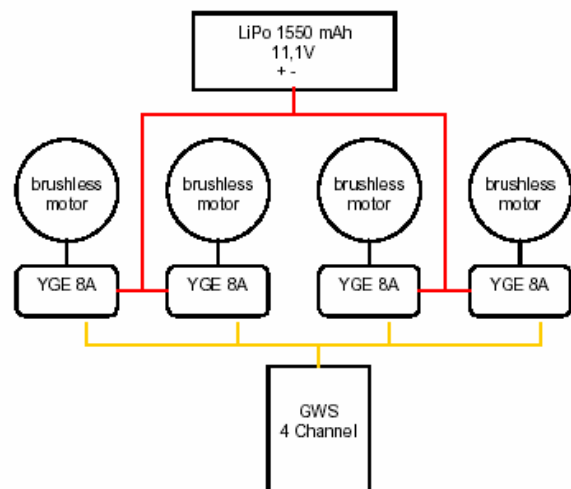


BILD 4. Anschlussbelegung

2.3.2. Schwenkmechanik

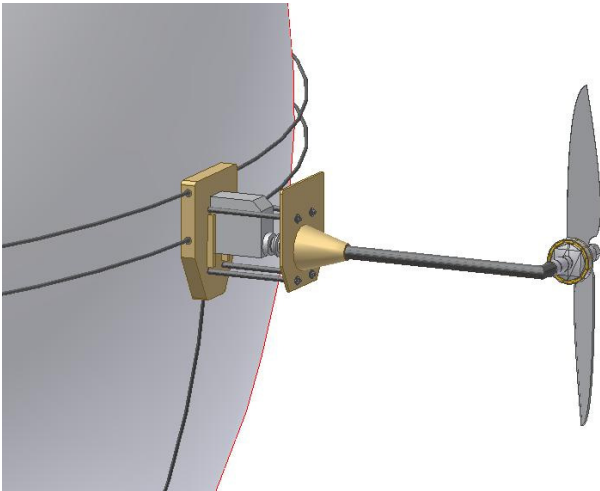


BILD 5. Schwenktriebwerk

Die Schwenkmechanik kommt bei den Generationen I und II zum Einsatz. Dazu sind auf den Seitenteilen zwei kleine Kanthölzer zur Verdrehung des Schwenkservos aufgeklebt. Das Schwenkservo ist mittels einer Lagerplatte aus Sperrholz, Distanzhülsen aus Karbon und Gewindestangen fixiert. Die Winkelarme mit den aufgesetzten Motoren sitzen, mit einem Splint fixiert, in einer Buchse aus Aluminium, die direkt mit dem Schwenkservo verbunden ist und in der Lagerplatte geführt wird. Die Schwenkmechanik ermöglicht einen Drehwinkel von 90°, sodass der Propeller nach vorn und senkrecht nach oben gerichtet werden kann.

2.3.3. Verstellpropellermechanik

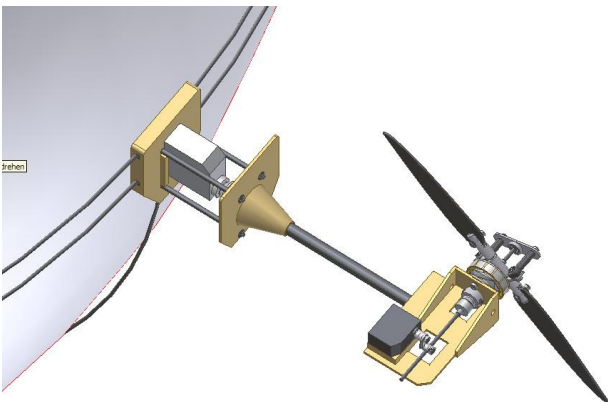


BILD 6. Schwenktriebwerk mit Verstellpropeller

Der Bau beschränkte sich beim Kugelblitz II ausschließlich auf die Herstellung der Verstellpropellermechanik, alle anderen Komponenten wurden vom Kugelblitz I übernommen. Bei den Motoren wurde die Motorwelle durch ein 3 mm Edelstahlrohr ersetzt. Die neuen Antriebseinheiten werden, wie bei Kugelblitz I, in die Lagerbuchsen der Seitenteile gesteckt und mit dem Schwenkservo verdrehssicher verschraubt. Um nur die Winkelarme des Kugelblitz I zu modifizieren musste eine Plattform konstruiert werden, die ein herkömmliches 9 g Mini-Servo aufnehmen kann und den Motor mit dem Winkelarm verbindet. Als Material kam das schon bewährte leichte und äußerst stabile 2 mm

Flugzeugsper Holz zum Einsatz. Diese Plattform ist mit 2-Komponentenkleber auf das Karbonrohr des Auslegers der Schwenkmechanik geklebt. Die Verstellpropellermechanik wird durch hohe Fliehkräfte belastet. Deshalb besteht sie aus Aluminiumbauteilen. Die Konstruktion wurde so ausgelegt, dass die Teile mit einer gewöhnlichen Dreh- und Fräsmaschine hergestellt werden konnten. Hierbei muss auf Präzision geachtet werden, da sich schon kleine Symmetrieabweichungen, bei den hohen Drehzahlen der Motoren in Form von starken Vibrationen unangenehm bemerkbar machen. Die Lagerung der Blatthalter wurde über einen einfachen Gewindezapfen ausgeführt. Eine konventionelle Lagerung mit Kugellagern hätte zu einer nicht mehr akzeptablen Baugröße geführt.

Die Einstellung des gewünschten Pitchwinkels erfolgt über eine durch den Motor gehende Hohlwelle. Diese Hohlwelle führt eine 2 mm Kohlenstofffaserstange die zur Anlenkung der Pitchbrücke führt. Die Nulllage der Pitcheinstellung kann mechanisch voreingestellt werden. Die exakte Einstellung erfolgt dann über die elektronische Trimmung am Fernsteuerungssender.

2.3.4. Quattroprop

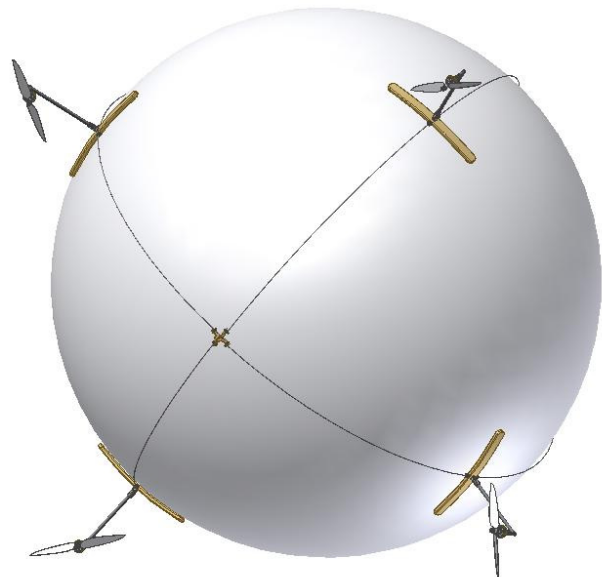


BILD 7. Vierstrahlige fokussierende Triebwerksanordnung

Der Kugelblitz III hat vier starre Triebwerke. Daher finden die Antriebseinheiten der Variante I wieder Verwendung. Die Winkelarme sind jetzt auf Bügel geklebt, die zur seitlichen Abstützung auf der Hülle aufliegen. Die Bügel bestehen aus einem Verbund aus je zwei gebogenen Sperrholzplanken, Karbonrovings und Balsaholz. Der Einsatz von Kohlenstoffasern macht die Bügel sehr leicht und stabil und ermöglicht eine, der Hülle angepasste Formgebung. Nach dem Aushärten des Verbundes werden die Kanten abgerundet und die Oberflächen splitterfrei abgeschliffen. Die Antriebseinheiten können auf den Ringen verschoben werden und an ihren Ausrichtungspunkten mit Stellringen fixiert werden. Insgesamt muss auch hier auf eine exakte Ausrichtung geachtet werden, da sonst die positiven Eigenschaften dieser Triebwerksanordnung eingeschränkt

werden.

Für eine dreistrahlig Variante müssen lediglich die rechtwinkligen Verbindungskreuze an Bug und Heck gegen neue mit 120° Winkeln ersetzt werden.

3. FLUGERPROBUNG

Die bisher vorgestellten Konstruktionsvarianten zeigen während der Flugerprobung die unterschiedlichsten Flugverhalten.

Diese sollen kurz vorgestellt werden und im nächsten Kapitel genauer untersucht und analysiert werden.

Hier sei auch noch mal zu sagen, dass die dargestellte Reihenfolge der Chronologie der Entwicklung folgt.

Angefangen mit der zweimotorigen Konfiguration mit Schwenktriebwerken und elektronischer Richtungsumkehr gefolgt von gleicher Konfiguration mit Verstellpropellern und schlussendlich die 4- bzw. 3-motorige Version mit schiefstrahliger Anordnung.

3.1. Zweimotorige Version mit Schwenktriebwerken und elektronischer Richtungsumkehr

Diese Version stellt den ersten Flugversuch dar und zeigt deutlich die Vor- und Nachteile von sphärischen Luftschiffen.

Diese sollen für einen 1. Ansatz kurz erläutert werden:

Vorteile:

- extreme Wendigkeit
- Massen liegen alle in neutralen Ebenen
- nur 2 Antriebe notwendig
- Standardpropeller können verwendet werden
- einfacher Aufbau
- effektive Höhensteuerung durch Schwenktriebwerke

Nachteile:

- extrem schwierig manuell zu kontrollieren
- elektronische Richtungsumkehr der bürstenlosen Motoren benötigt zu viel Zeit
- Richtungsstabilität ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr gewährleistet

Die konventionelle zweimotorige Konfiguration ist somit also hinsichtlich ihrer Steuerung inhärent instabil und erfordert permanente Korrekturen.

3.2. Zweimotorige Version mit Schwenktriebwerken und Verstellpropellern

Diese Version stellt die 2. Variante dar und zeigt schon im Verhältnis zur 1. Variante deutlich bessere Flugleistungen. Ihr Unterschied liegt hauptsächlich im Antriebskonzept. Der Wegfall der elektronischen Drehzahlsteller für Vor- und Rückwärtsbetrieb lösen das Problem der unzuverlässigen und zeitaufwändigen Richtungsumkehr. Die langen Reaktionszeiten lösen die Verstellpropeller welche positiven sowie negativen Pitch ermöglichen. Die Reaktionszeit wird extrem verkürzt.

Zusammenfassend die Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- extreme Wendigkeit
- Massen liegen alle in neutralen Ebenen
- nur 2 Antriebe notwendig
- zuverlässige Richtungsumkehr
- extrem kurze Reaktionszeiten auch bei Richtungswechseln
- effektive Höhensteuerung durch Schwenktriebwerke

Nachteile:

- aufwändigere Mechanik
- etwas höhere Masse
- 2 zusätzliche Steuerungsachsen für die Blattverstellung notwendig

3.3. 4- bzw. 3-motorige Version mit "schiefstrahliger" Anordnung

Diese Version soll eine Reduzierung des Luftwiderstands durch konvergierende Propellerstrahlen bewirken. Die Steuerung erfolgt ausschließlich durch differentiellen Schub. Es sind hierbei keine Schwenkmechanismen oder Schubablenker erforderlich. Die erste Variante dieser Version ist ausgestattet mit 4 Motoren, wird aber gegenwärtig durch eine 3-motorige abgelöst. Diese Anordnung erlaubt eine tiefere Schwerpunktlage zur Verbesserung der Höhensteuerung. Je tiefer der Schwerpunkt liegt, desto besser wird ein Schwanken um die Querachse verhindert.

Zusammenfassend die Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- einfacher Aufbau
- keine Mechanik für Schwenktriebwerke sowie Blattverstellung notwendig
- höhere Geschwindigkeiten bei Geradeausfahrt möglich
- 3-motorige Y-Anordnung ergibt günstigere Schwerpunktlage im Gegensatz zur 4-motorigen X-Anordnung

Nachteile:

- schlechtere Wirkung bei der Höhensteuerung
- Schwerpunktveränderung durch Massen außerhalb der Neutralachsen
- Schwerpunkt liegt höher als bei den anderen Varianten, dadurch unruhiger auf der Querachse
- 3 bzw. 4 Antriebe notwendig

4. AERODYNAMISCHE UNTERSUCHUNG

Dieses Kapitel beschreibt die Analyse der beobachteten Phänomene in chronologischer Reihenfolge und führt hin zum letzten Entwicklungsstand der Versuchsreihen. Erläutert werden Ursachen und Ziele die durch die Erkenntnisse erreicht werden sollen. Dabei geht es um Möglichkeiten der Reduzierung des Luftwiderstands, der Stabilisierung des Nachlaufwirbels bei einer Kugel sowie um erste Varianten einer Schleppanlage zur Messung von Luftwiderständen von Kleinluftschiffen. Des Weiteren wird auf einen Datenlogger eingegangen, welcher die Aufzeichnung verschiedenster Daten während Freiflugversuchen ermöglicht. Zum besseren Überblick

diene eine Übersicht auftretender aerodynamischer Phänomene.

- 1) Schwanken um die Querachse beim Steigen bzw. Sinken
- 2) Rausdrehen bei höheren Geschwindigkeiten
- 3) Erreichen höherer Geschwindigkeiten als bei Variante 1 und 2

Erklärung der möglichen Ursachen:

zu 1) Das Schwanken um die Querachse, aufgetreten bei der 3. Variante mit 3 bzw. 4 Triebwerken, rührt mit sicherer Wahrscheinlichkeit vom zu hoch liegenden Schwerpunkt durch die über dem Neutralpunkt liegenden Triebwerke. Zum anderen aber auch von einer deutlichen Übermotorisierung. Die Triebwerke haben so viel Leistung, dass problemlos ein Überschlag möglich ist. Das Phänomen tritt meist bei höheren Leistungen auf. Das heißt also, dass das Nickmoment bei asymmetrischem Schub wegen der nicht ausreichenden Tieflage des Schwerpunkts nicht durch das rückstellende statische Pendelmoment der Kugel kompensiert wird. Somit wird der Senkrechte Anteil der Schubkomponente, sei er positiv oder negativ, also kleiner null oder sogar umgedreht.

zu 2) Das seitliche Ausbrechen bei höheren Geschwindigkeiten, welches bei den ersten beiden Varianten ungefähr bei gleicher Geschwindigkeit und bei der 3. Variante erst deutlich später auftrat, zeigt nach durchgeführter Geschwindigkeitsmessung eine ungefähre Übereinstimmung mit dem oben schon erwähnten Umschlagspunkt der Kugel.

zu 3) Das Erreichen höherer Geschwindigkeiten der 3. Variante beruht auf späteres Eintreten des Umschlagspunktes der Kugel. Hervorgerufen durch eine Reduzierung des Luftwiderstandes durch schon im Göttinger bzw. Suryanarayana (Bangalore) Versuch nachgewiesene Widerstandsverringern durch Injektion eines gerichteten Strahls in die turbulente Totwasserzone. Die Fokussierung der Propellerstrahlen ruft ein ähnliches Phänomen hervor.

Die im Punkt 3 gewonnenen Erkenntnisse sollen aufgrund der positiv verlaufenen Fahrversuche genauer untersucht werden. Hierbei wird zunächst unberücksichtigt bleiben, dass das Steigverhalten der derzeitigen Version schlechter ist als in den anderen Varianten. Der Fokus liegt beim Erreichen höherer Geschwindigkeiten.

4.1. Ermitteln aerodynamischer Beiwerte durch Zugversuche (frei und geführt)

Um eine genaue Aussage zu den bei Freiflugversuchen beobachteten Phänomenen machen zu können, müssen diverse Beiwerte bekannt sein. Diese setzen sich aus eingesetzten Antriebsleistungen, Luftwiderständen, Geschwindigkeiten, Temperatur, Druck, Wirkungsgrade sowie Fehlerfaktoren zusammen. Diese Vielzahl dieser Werte sind schwierig zu erfassen, wenn halbwegs genaue Werte gewünscht sind. Eine Möglichkeit ist, die Werte einzeln zu ermitteln. Also messen der Motorströme, -spannungen und Drehzahlen im Stand. Um erste Werte zum Luftwiderstand bei bestimmten Geschwindigkeiten zu ermitteln, könnte die einfache Kugelformel dienen. Diese jedoch hat den Nachteil, dass sie nur die ideale Kugel

betracht. Davon sind jedoch die Testmodelle konstruktionsbedingt, sei es durch Stolperfallen oder die Antriebe, allerdings weit entfernt. Ein Windkanal wäre eine Möglichkeit, aber in der Größe zu aufwändig und schwer zugänglich. Eine relativ einfache Lösung ist eine Schleppanlage. Mit dieser können diverse Geschwindigkeiten gefahren werden. Außerdem besteht die Möglichkeit über eine Umlenkrolle und einem Waagelement die Zugkraft zu ermitteln. Hierbei darf allerdings auch nicht vergessen werden, dass über Rollenmechanismen Reibungsverluste auftreten können. Auch Richtungsabweichungen können die Ergebnisse verfälschen. Auf einer geschlossenen Seilbahnanlage von 40-50 Meter Länge lassen sich aber recht geradlinige Teststrecken erzielen, wie erste Versuche bestätigt haben. Die folgende Abbildung zeigt einmal ein Schema eines solchen Versuchsaufbaus mit einem voll ausgerüsteten Modell mit Eingenantrieb.

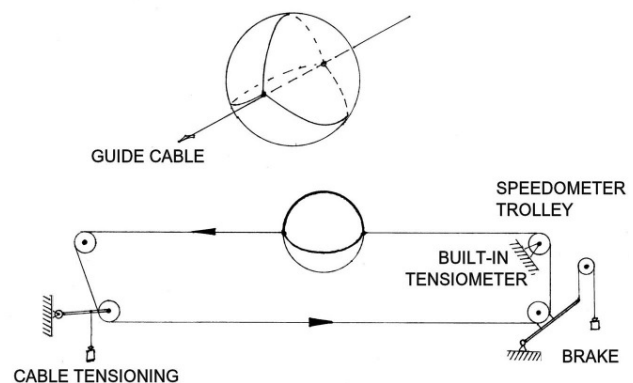


BILD 8. Schematischer Aufbau des Zugversuchs

Aufzeichnungsdaten des Datenloggers:

- Propellerdrehzahl aller Propeller
- Strom und Spannung aller Motoren
- Geschwindigkeit über die Seilumlenkrolle
- Seilzugspannung über die Seilumlenkrolle
- Ferner: Luftdruck und Temperatur

Option: Verwendung eines Anemometers zur Ermittlung der Geschwindigkeit

4.2. Statische Höhensteuerung

Zur statischen Höhensteuerung werden vorzugsweise nur die vertikalen Schubkomponenten von geeigneten Triebwerken verwendet, z.B. das obere Triebwerk einer dreimotorigen Version. Bei einer Schrägstellung von 30° könnte theoretisch 50 Prozent des Schubs als Vertikalkomponente verwendet werden. Allerdings wird durch das gleiche Triebwerk ein Drehmoment um die Querachse erzeugt, das durch die Pendelwirkung des niedrig gelegenen Schwerpunkts kompensiert werden kann (BILD 9.).

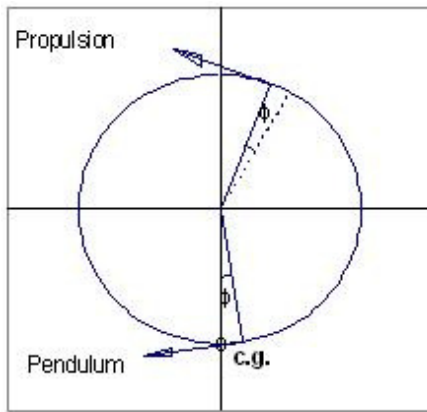


BILD 9. Momentenausgleich Antrieb vs. Pendelausschlag des Schwerpunkts

Auf alle Fälle wird die Kugel um einen Neigungswinkel ϕ verdreht. Folgende Gleichungen gelten:

$$T \cdot R = r \cdot A \cdot \sin \phi \quad (3)$$

- T = Triebwerksschub
- R = Kugelradius
- r = tatsächlicher Abstand des Schwerpunkts vom Mittelpunkt
- A = statischer Auftrieb = Gewicht im Gleichgewichtszustand

$$(T / A) = (r / R) \cdot \sin \phi \quad (4)$$

Hierbei stellt (T/A) den notwendigen dimensionslosen Schub dar, um einen Neigungswinkel ϕ zu erzeugen.

Für die statische Höhensteuerung interessiert jedoch die erzielbare Vertikal-Schubkomponente des Treibwerks; hier in dimensionsloser Darstellung:

$$(T_{\text{vert}} / A) = (r / R) \cdot \sin(30^\circ - \phi) \cdot \sin \phi \quad (5)$$

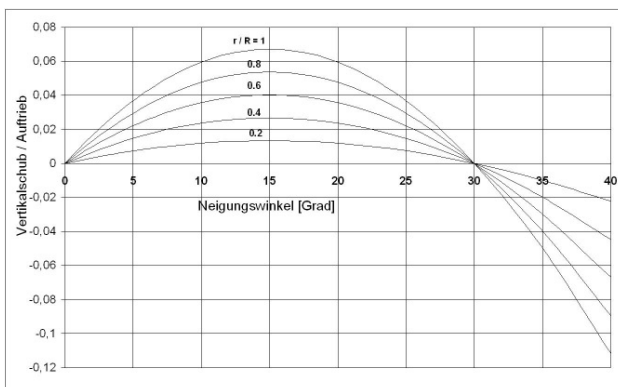


BILD 10. Erzielbarer Vertikalschub als Funktion des Neigungswinkels ϕ

Bei einem Neigungswinkel von 30° verschwindet die Vertikalkomponente und wird bei größeren Werten sogar negativ. Die höchstmöglichen Hubwerte werden daher bei einer Neigung von 15° erzielt. Allerdings ist darüber hinaus der Schwerpunktsabstand r vom Mittelpunkt als Parameter zu berücksichtigen, wie aus BILD 10. erkennbar. Im indifferenten Zustand ($r = 0$) verschwindet

das rückstellende Pendelmoment, und es muss eine „dynamische“ Steuerung programmiert werden.

4.3. Dynamische Steuerung

Die dynamische Steuerung ist im Wesentlichen eine Impulssteuerung, die dem kombinierten statischen Schub der (drei bzw. vier) Triebwerke überlagert ist. Diese Impulse bewirken Drehungen der Kugel um ihre drei Achsen und müssen vorzugsweise durch ein geeignetes Kreiselssystem geregelt werden.

Bei der dynamischen Höhensteuerung wird nach Art eines Flächenflugzeugs ein Lagewinkel ϕ angesteuert, wodurch eine Vertikalkomponente des Gesamt-Vortriebschubs erzeugt wird:

$$(T_{\text{vert}} / A) = (T / A) \cdot \sin \phi \quad (6)$$

4.4. Höhensteuerung durch Trimmung

Selbst bei hoher Schwerpunktslage lässt sich z.B. eine „quasi-hecklastige“ Trimmung bewerkstelligen, durch die die Kugel einen Lagewinkel erhält. Es ist zu überlegen, ob evtl. durch eine RC-Steuerung der Trimmungsgewichte (Batterien) eine Verbesserung der marginalen Modellsteuerung erreicht werden kann. Prinzipiell entfallen die gravierenden Probleme der Modellsteuerung bei größeren (bemannten) Modellen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die durchgeführten Versuche gezeigt haben, dass die Kugel - wie schon vermutet - eine extreme Wendigkeit um die Hochachse besitzt. Dieses allerdings nur bei einer konventionellen Anordnung mit 2 Propellern in der Äquatorebene.

Die Idee die Propellerstrahlen auf einen Fokus zu richten verleiht der Kugel allerdings unter Einschränkung der Wendigkeit eine extreme Richtungsstabilität was für Kugeln eigentlich ungewöhnlich ist. Die Probleme der Höhensteuerung mit einem Aufschaukeln über die Querachse liegen im kleinen Maßstab des Versuchsmodells, weil hier der Schwerpunkt sehr hoch liegt und die Massen sehr nahe beieinander liegen.

Für weitere Versuche ist es sicherlich möglich den vorhandenen Antriebsstrang für ein Modell mit doppelter Größe zu verwenden. Damit könnte der hoch liegende Schwerpunkt wesentlich weiter nach unten verlagert werden. Bei gleichen Antrieben könnte bei doppelter Größe natürlich auch wesentlich mehr Nutzlast transportiert werden was die Schwerpunktproblematik weiter sehr verbessern würde.

Bibliografie

- [1] J. K. Bock, B. Knauer
Leichter als Luft – Transport- und Trägersysteme,
ISBN 3-86180-139-6, Verlag Frankenschwelle,
Hildburghausen, 2003 – Abschn. 9.4.3 u. 9.5.3.1

- [2] G. K. Suryanarayana
Journal "Experiments in Fluids" 16, 1992,
pp 73-81 (Fig. 2 page 75 ff)
- [3] M. Lu, F.-R. Grosche, G.E.A. Meier
Widerstandsverminderung bei stumpfen Körpern
durch passive Ventilation des Nachlaufs
Institut für Strömungsmechanik, DLR,
Göttingen –1998
- [4] J. K. Bock, G. Traut
Mehrmotoriges Antriebssystem für sphärische
Luftschiffe unter Berücksichtigung der inter-
aktiven Wirkung von Vortrieb und Widerstand
DGLR Workshop VIII, Köln-Porz, 17.-18.6.2005
- [5] J. K. Bock, G. Traut
Propulsion / Drag Interaction Configuration for
Spherical Airships
AEROSTATION, Vol 28, No 3, ISSN 0741-5974
2005
- [6] Ph. Neuhaus, J. K. Bock, G. Traut
Widerstandsmessungen an einem angetriebenen
Luftschiffmodell mithilfe einer geschlossenen
Seilbahn
DGLR Workshop IX , Dresden, 23.-24.6.2006
- [7] J. Eissing
An Airship Pylon Race
AEROSTATION, Vol 27, No 2, ISSN 0741-5974
2004
- [8] J. K. Bock
Structure of a Large Spherical Airship
DGLR Workshop II - Zeppelinheim, 17.-
18.4.1998
- [9] G. Younger-Lewis
Big Balloons Prescribed as Cheap Cure for What
Ails Nunavut
Nunatsiaq News, Iqaluit, Canada – 20.5.2005
- [10] H. Colting
High Altitude
Airships to the Arctic – Symposium III
Sustainable Northern Transportation
Proceedings pp 120-122
Winnipeg, Manitoba – 31.5.-2.6.2005
- [11] J. K. Bock
Complementary Topics for Airship Research
3rd International Airship Convention and
Exhibition, Friedrichshafen – 2000
Abschn. 3.3.1