

Bernhard G. Kämpf

**Flugmechanik und Flugregelung  
von Luftschiffen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Luft- und Raumfahrt**

Band 41

Zugl.: Diss., Stuttgart, Univ., 2003

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der  
Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von  
Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem  
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Daten-  
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-  
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2004

ISBN 3-8316-0432-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung und Motivation.....	1
1.2	Ausgangssituation und Umfeld.....	3
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	5
2	Mathematische Modellbeschreibung.....	7
2.1	Achsenkreuze und flugmechanische Größen.....	7
2.1.1	Bezeichnung gerichteter flugmechanischer Größen.....	7
2.1.2	Achsenkreuze, Fluglage und Geschwindigkeiten.....	8
2.1.3	Körperfeste Achsen.....	11
2.1.4	Luftschiffsteuerung.....	11
2.2	Bewegungsgleichungen.....	12
2.2.1	Impuls- und Drallsatz, Starrkörperbewegungsgleichungen.....	13
2.2.2	Bewegungsdifferentialgleichung der Fluglage und des Ortes.....	16
2.2.3	Berücksichtigung weiterer dynamischer Anteile.....	17
2.2.4	Zusammenfassende Beschreibung des Prozesses Luftschiff.....	17
2.3	Aerostatik, Masse und Gewicht.....	19
2.3.1	Atmosphärenmodell und Gasgesetze.....	19
2.3.2	Definition der Systemgrenzen.....	21
2.3.3	Aerostatischer Auftrieb.....	22
2.3.4	Massenmodell.....	22
2.3.5	Gewichtskraft.....	22
2.3.6	Statischer Nettoauftrieb.....	23
2.4	Schubkräfte.....	24
2.4.1	Allgemeine Formulierung.....	24
2.4.2	Stationäres Schubmodell.....	25
2.4.3	Dynamik der Antriebe.....	26
3	Modellbeschreibung Aerodynamik und Windwirkung.....	27
3.1	Einleitung.....	27
3.1.1	Aufbau und Ausrichtung des Aerodynamik-Modells.....	27
3.1.2	Aufbau des Kapitels.....	30
3.2	Verteilte potentialtheoretische Rumpfkräfte.....	31
3.2.1	Verteilte potentialtheoretische Rumpfkräfte bei Windstille.....	31
3.2.2	Verteilte potentialtheoretische Rumpfkräfte bei Flug durch Windfeld.....	40
3.3	Integrale potentialtheoretische Rumpfkräfte.....	47
3.3.1	Berechnung der Rumpfindegrale in homogener, windfreier Anströmung.....	47
3.3.2	Integrale potentialtheoretische Rumpfkräfte bei Flug durch Windfeld.....	52
3.3.3	Spezialfall: Integrale Kräfte auf geschlossenen Rotationsellipsoiden.....	53
3.4	Kräfte nach Potentialtheorie und nach Theorie Schlanker Körper im Vergleich.....	54
3.4.1	Verteilung und Aufintegration der Vertikalkräfte.....	55
3.4.2	Verteilung und Aufintegration des Nickmoments.....	57
3.4.3	Zusammenfassende Diskussion.....	58
3.5	Rumpfkräfte infolge viskoser Effekte.....	59
3.5.1	Kräfte infolge Längsströmung: Längswiderstand.....	59
3.5.2	Kräfte infolge Querströmung: Querströmungswiderstand.....	60
3.6	Aerodynamik der Leitwerke und des Heckbereichs.....	63
3.6.1	Leitwerkskräfte unter ebener Anströmung bei kleinen Anstellwinkeln.....	64

3.6.2	Aerodynamische Leitwerkskräfte unter räumlicher Anströmung.....	66
3.6.3	Berücksichtigung der Ruderauslenkung .....	70
3.6.4	Instationäre Leitwerkskräfte .....	71
3.7	Das Aerodynamische Gesamtmodell .....	72
3.7.1	Festlegung der Modellbereiche, Wahl der Integrationsgrenzen.....	72
3.7.2	Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Rumpf und Heck .....	73
3.7.3	Das Gesamtmodell bei nicht homogener Anströmung .....	73
3.7.4	Gesamtmodell in integraler Form .....	74
3.7.5	Übergang zur Beiwerteschreibweise.....	75
3.8	Analyse des Gesamtmodells unter Wind.....	79
3.8.1	Mathematische Modellierung des Windes .....	80
3.8.2	Die Wirkung von Seitenwindscherungen unterschiedlicher Wellenlängen .....	82
3.8.3	Wirkung des beschleunigten Windes .....	86
3.9	Ansatzverfeinerungen und Schätzung der Modellparameter .....	88
3.9.1	Erhöhung der Genauigkeit des Rumpfmodells .....	88
3.9.2	Bestimmung von Modellparametern.....	90
4	Untersuchung des Flugverhaltens .....	97
4.1	Stationäre Flugzustände und Flugleistung .....	97
4.1.1	Stationärer symmetrischer Geradeausflug .....	98
4.1.2	Stationärer horizontaler Kurvenflug .....	106
4.2	Lineare Bewegungsgleichungen im symmetrischen Horizontalflug .....	114
4.2.1	Betriebspunkte, Linearisierung und Zustandsraumdarstellung.....	114
4.2.2	Entkopplung in Längs- und Seitenbewegung .....	114
4.3	Eigenverhalten und Stabilität im symmetrischen Horizontalflug .....	115
4.3.1	Typische Lage der Pole und Modalanalyse.....	116
4.3.2	Näherungsansätze für die Eigenbewegungen und analytische Polberechnungen.....	118
4.3.3	Eigenverhalten bei unterschiedlichen Flugeschwindigkeiten .....	122
4.3.4	Eigenverhalten unter Variation der Konfiguration und der Modellparameter .....	127
4.4	Übertragungsverhalten und Frequenzantworten .....	133
4.4.1	Übertragungsfunktionen und stationäres Übertragungsverhalten.....	133
4.4.2	Frequenzantwort auf Anströmungsanregung (Wind).....	136
4.5	Nichtlineares Flugverhalten des Luftschiffes.....	138
4.5.1	Reaktion des Luftschiffes auf Störungen des Anstell- und Schiebewinkels.....	138
4.5.2	Reaktion des Luftschiffes auf Steuereingänge .....	141
5	Flugregelung.....	147
5.1	Einleitung und Motivation .....	147
5.2	Regelungsaufgaben und Auslegungsziele .....	148
5.2.1	Interpretation der Pilotenkommandos.....	149
5.2.2	Stabilisierung und Dämpfung der Flugbewegung .....	150
5.2.3	Stabilisierung und Regelung der Fluglage und der Flugbahn.....	150
5.3	Entwurf nach klassischen Methoden.....	150
5.3.1	Einzelsignalarückführungen zur Verbesserung der Flugeigenschaften .....	150
5.3.2	Anwendungsbeispiel: Regelung der Längs- und Seitenbewegung von Lotte .....	152
5.4	Geregelter und ungeregelter Flug durch Windfeld.....	155
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	159
A	Modellparameter des Luftschiffes Lotte .....	169
A.1	Geometrie- und Masseparameter .....	169
A.2	Aerodynamikparameter .....	170

B	Aerodynamische Rumpfkkräfte nach der Methode der virtuellen Massen und nach der Theorie Schlanker Körper .....	172
B.1	Integrale Rumpfkkräfte und der Tensor der virtuellen Massen .....	172
B.2	Rumpfkkräfte nach der Theorie Schlanker Körper unter ebener Anströmung .....	175
B.2.1	Theorie Schlanker Körper .....	176
B.2.2	Diskussion der Kräfte infolge stationären Fluges .....	178
B.2.3	Approximation der Kraftverläufe für nicht schlanke Körper nach Munk .....	178
B.2.4	Vergleich der Resultate nach der Theorie Schlanker Körper mit den exakten Resultaten für Rotationsellipsoide .....	179
B.3	Rumpfkkräfte unter räumlicher Anströmung und Approximation für nicht schlanke Körper .....	180
B.3.1	Impuls und Drall einer Kreisscheibe .....	181
B.3.2	Resultierende Kräfte und Momentenverlauf .....	182
B.4	Rumpfkkräfte unter Wind nach der Theorie Schlanker Körper .....	183
B.4.1	Einleitung und Definitionen .....	184
B.4.2	Berechnung der verteilten Rumpfkraft .....	185
B.4.3	Darstellung und Diskussion der Kraftanteile .....	188
C	Lineare Kraft- und Bewegungsgleichungen .....	191
C.1	Lineare Gleichungen und Zustandsraumdarstellung .....	191
C.1.1	Die Matrizen $M$ , $K_x$ , $F_x$ und $F_u$ in allgemeiner Form .....	192
C.1.2	Die Matrizen $M$ , $K_x$ , $F_x$ und $F_u$ im horizontalen Geradeausflug .....	192
C.1.3	Kraftderivativa dieser Konfiguration .....	194
C.1.4	Zusammenhang zwischen Kraftderivativa und aerodynamischen Beiwerten .....	197
C.2	Lineare Bewegungsgleichungen, Systemmatrizen .....	198
C.2.1	Invertieren der Massenmatrix .....	198
C.2.2	Dynamikmatrix $A$ der Translations- und Drehgeschwindigkeiten .....	200
C.2.3	Die Eingangsmatrix $B$ .....	202
C.2.4	Lineare Differentialgleichungen der Lagewinkel und Flughöhe .....	202

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung und Motivation

Der menschliche Traum vom Fliegen wurde erstmals mit Hilfe eines Ballons unter Anwendung des Prinzips "Leichter als Luft" von den Gebrüdern Montgolfière verwirklicht. Seither nehmen Luftschiffe einen einzigartigen Platz in der Geschichte der Luftfahrt ein. Immer wieder waren sie Vorreiter neuer Technologien, ihr Weg ist aber auch von etlichen Misserfolgen gesäumt: So gelang der erste Flug mit Rückkehr zum Anfangspunkt des Fluges mit einem Luftschiff, bereits vor 1900 hob das erste Ganzmetallluftschiff ab, und schon Anfang des letzten Jahrhunderts wurden fahrplanmäßig Luftschifffahrten über den Atlantik angeboten. 1936 jedoch geht die wasserstoffgefüllte Hindenburg in Lakehurst in Flammen auf. Diese Katastrophe beendete nicht nur die Ära der Passagierluftschiffahrt sondern ging auch als erstes weltweites Film-Medienergebnis in die Geschichte ein. In den folgenden Jahren wurden Luftschiffe von der amerikanischen Navy im grossen Stil zur Begleitung und Absicherung von Flottenverbänden eingesetzt. Davon wird berichtet, dass kein Frachtschiff durch U-Boote versenkt werden konnte, wenn Luftschiffe den Konvoi überwachten.

In der Zeit danach verloren Luftschiffe jedoch auf technologischem wie auch wissenschaftlichem Gebiet den Anschluss an die Entwicklung von Flugzeug und Helikopter. Trotzdem ist das technische und kommerzielle Interesse in Luftschiffe in jüngster Zeit wieder stark gestiegen. Gründe dafür sind ihre Umweltfreundlichkeit, die Möglichkeit mit Sonnenenergie zu fliegen und weitere systemspezifische Eigenschaften, durch welche Luftschiffe ergänzende Märkte zu denen der Fluggeräte schwerer als Luft bedienen können. Mit neuen Luftschiffkonzepten und unter Einsatz neuer Technologien will man den zurzeit einzigen wirtschaftlichen Einsatzbereich als Werbeträger verlassen. Dazu werden im Folgenden einige aktuelle Projekte genannt.

Zeppelin in Friedrichshafen baut und fliegt das Luftschiff "Zeppelin NT", konzipiert für Touristen-, Überwachungs- und Messflüge. Die Hamilton Airship Company in Südafrika plant den Bau luxuriöser Passagierschiffe, dasselbe Ziel verfolgt die niederländische Rigid-Airships Company. Die Luftschiffe der englischen Firma Airship Technology sollen als Frühwarn- und Überwachungssysteme eingesetzt werden. Firmen in Deutschland, Japan, England und USA planen den Einsatz von Luftschiffen als hochfliegende Trägerplattformen für Telekommunikations- und Überwachungssysteme. Die deutsche CargoLifter AG konstruiert ein Transportluftschiff für den Transport schwerer und übergrosser Güter.

Das Projekt, welches den Autor zur Beschäftigung mit der Thematik motivierte, soll besonders hervorgehoben werden. Eine Gruppe von Studenten am Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart hatte sich 1992 zum Ziel gesetzt, ein unbemanntes Klein-Luftschiff als Träger für unterschiedlichste Messeinrichtungen zu konstruieren. Bereits im darauffolgenden Jahr hob "Lotte", das erste mit Sonnenenergie betriebene Luftschiff der Welt, zu ihrem Erstflug ab.

Um das Einsatzspektrum von "Lotte" zu erweitern und um die Missionen zu automatisieren, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Einsatz eines Flugregelungssystems geplant. Die flugmechanischen Kenntnisse und verfügbaren Grundlagen für den Entwurf solcher Autoflug-Systeme fehlten oder waren inkonsi-

stent: Durch ‐Lotte‐ wurden mehr wissenschaftliche Fragen aufgeworfen als beantwortet werden konnten und es wurde insbesondere der schwache Stand der Forschung an luftschifftheoretischen Grundlagen festgestellt.

Dies betraf auch die Kenntnisse über das Flugverhalten in Wind. Die Windempfindlichkeit am und in Nähe des Bodens stellt für Luftschiffe nach wie vor ein zentrales Problem dar. Um die Manövrierfähigkeit zu erhöhen werden beim Zeppelin NT oder auch beim geplanten CargoLifter Manövriertriebwerke eingesetzt. Die Einschätzung der Windempfindlichkeit ist Voraussetzung zur Dimensionierung dieser Triebwerke, aber auch für den Entwurf ihrer Ansteuerung und Regelung.

### *Charakteristische Unterschiede zur Flugmechanik und Aerodynamik von Flächenflugzeugen*

Durch das Zusammenspiel von Aerostatik und Aerodynamik unterscheidet sich die Flugmechanik von Luftschiffen und Flächenflugzeugen wesentlich. Die Aerostatik als wichtigster Auftriebslieferant überlässt der Aerodynamik vorwiegend die Aufgabe der Flugsteuerung und der Kompensation aerostatischen Ungleichgewichts.

Die Aerostatik entwickelt ihrerseits interessante Eigenschaften. Befindet sich das Auftriebsgas im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebungsluft, kompensiert der aerostatische Auftrieb unabhängig von der Flughöhe die Gewichtskraft. Das Luftschiff besitzt somit keine oder kaum potentielle Energie. Beim Übergang in den Steig- oder Sinkflug ändert sich die Fluggeschwindigkeit nicht und für die Überwindung der Höhe muss (in erster Näherung) keine Energie aufgewendet werden. Somit fällt eine Phygoide, ein Austausch zwischen kinetischer und potentieller Energie, für Luftschiffe aus. Während bei kleinen Luftschiffen wie Lotte instationäre Aerostatik-Effekte infolge des Verhältnisses von Luftschiffoberfläche zu Volumen vernachlässigt werden können, beeinflussen sie bei grossen Luftschiffen wie beispielsweise dem CargoLifter das Vertikalflugverhalten. Im Steig- und Sinkflug wird das thermische Gleichgewicht gestört, es findet ein oszillierender Austausch zwischen thermischer und kinetischer Energie statt: Es entwickelt sich eine ‐aerostatische Phygoide‐.

Die Aerodynamik von Luftschiffen unterscheidet sich wesentlich von der Aerodynamik von Flächenflugzeugen. Das Umströmungsbild wird vom großvolumigen Rumpf des Luftschiffs dominiert. Es bildet sich eine dreidimensionale Umströmung mit dreidimensionaler Grenzschichtausbildung und entsprechenden Ablöseerscheinungen aus. Auch die Leitwerksflächen haben nicht genau dieselbe Funktion wie die von Flugzeugen. Es steht nicht ein gutes Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand im Vordergrund, sondern die stabilisierende Wirkung. Da die Rumpfaerodynamik ein destabilisierendes Moment erzeugt muss die Stabilisierung auch bei größeren Anstellwinkeln und im Falle von Strömungsabriss gewährleistet sein, das Luftschiff darf nicht ‐aus dem Ruder laufen‐.

Eine weitere charakteristische Eigenschaft der Aerodynamik beruht auf der systembedingten Tatsache, dass die Masse der verdrängten Luft der Größenordnung der Masse des Fluggeräts entspricht. Durch die Umströmung des Rumpfes sind daher Luftmassen in Bewegung, welche der Luftschiffmasse entsprechen. Beschleunigt sich das Luftschiff, so muss auch die Umströmung beschleunigt werden. Diese Impulsänderung erfordert eine zwischen Rumpfkörper und Fluid wirkende Kraft, welche auf den Körper beschleunigungshemmend wirkt. Diese Kraft wird deshalb als Effekt der ‐scheinbaren‐ oder ‐virtuellen‐ Masse (englisch: ‐apparent mass‐, ‐virtual mass‐) bezeichnet. Diese zusätzliche Trägheit weist jedoch nicht die Charakteristik der Starrkörperträgheit auf: Sie variiert mit der Beschleuni-

gungsrichtung und erzeugt somit Kopplungen zwischen den Bewegungszuständen, die nur durch Körpersymmetrien wieder aufgehoben werden können. Auch im Kurvenflug, bei welchem Richtung von Impuls und Drall der scheinbaren Massen geändert werden, resultieren Kräfte.

## 1.2 Ausgangssituation und Umfeld

Im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts wurden neben großartigen technischen Leistungen auch wegweisende theoretische Arbeiten durch den Luftschiffbau motiviert. Aus dieser Zeit sind deutsche, englische und amerikanische Studien zur Aerodynamik und Flugstabilität von Luftschiffen bekannt. Neben grundlegenden theoretischen Arbeiten [1],[2], wurden auch Windkanalmessungen [3] und Flugtests durchgeführt [4]. In Deutschland wurden mit den Zeppelin Verögerungstests durchgeführt, darüber berichtete Munk 1921 und diskutierte dabei den Einfluss der scheinbaren Massen [5]. Einen interessanten Rückblick und eine Zusammenstellung und Auswertung dieser Arbeiten findet man in [6], wo die Studien insbesondere auch vor dem Hintergrund des damaligen Stands des theoretischen Wissens und der verfügbaren Meßtechnik diskutiert werden.

Die im wesentlichen von Munk eingeführte “Theorie der Schlanken Körper”, bei der das Strömungsbild um den Rumpf als eben angenommen wird, wurde um 1958 von Calligeros und McDavitt bei ihrer theoretischen Untersuchung zur Windempfindlichkeit von Luftschiffen wieder aufgegriffen [7]. Um viskose Strömungseffekte berücksichtigen zu können wurde der Ansatz um einen Querströmungswiderstand erweitert. Dieses Verfahren hatte sich zur Modellierung der Aerodynamik von Flugkörpern bewährt [8], [9]. Eine Weiterentwicklung dieser Ansätze findet man 1977 bei Putman et. al. in [11], wo die Ansätze mit Messungen an Luftschiffen (meist aus der Zwischenkriegszeit) verglichen werden. Zudem werden Ansätze zur Modellierung der Leitwerkskräfte, basierend auf Traglinientheorie und nichtlinearer Anteile zur Berücksichtigung von Ablösewirbeleffekten und Queranströmungswiderstand, beschrieben. Die Ansätze für Rumpf und Leitwerke werden aber nur getrennt behandelt. 1983 nehmen Jones und DeLaurier diese Ansätze auf und erstellen ein Gesamtmodell [12]. Durch die Einführung von Wechselwirkungsfaktoren zwischen Rumpf und Leitwerken und einer Anpassung der Querwiderstandsbeiwerte gelingt es ihnen ein gegenüber Windkanaldaten validiertes, halbempirisches Modell zu entwickeln. Bei der Erweiterung ihres Ansatzes zur Berücksichtigung von Drehbewegungen gehen Jones und DeLaurier fehlerhaft vor, erhalten in der Endsumme aber trotzdem das korrekte Resultat: Anstatt die instationären Terme nach Munk zu verwenden, leiten sie aus dessen stationärer Teillösung durch falsche zeitliche Differenzierung wieder instationäre Terme ab. Dieses Vorgehen führte zu einer Diskussion zwischen den Autoren und Etkin[13],[14], wurde jedoch selbst in späteren Papieren von Jones und DeLaurier wieder verteidigt [15],[16]. Nichtsdestotrotz liefern die Arbeiten eine Methode zur ersten Schätzung der dämpfenden Derivativa  $c_{m_q}$  und  $c_{m_r}$ . Der Modellansatz wurde in [17] für Luftschiffe mit invertierten Y-Leitwerken erweitert.

Mit diesen Arbeiten endet die Entwicklung analytischer Aerodynamikmodelle. Die potentialtheoretischen Rumpfkkräfte werden dabei immer noch nach der Theorie Schlanker Körper, korrigiert mit den von Munk eingeführten Faktoren, modelliert. Diese Methoden schätzen die Verteilung der aerodynamischen Kräfte über die Rumpflängsachse im Geradeausflug zwar gut ab, sie können aber beispielsweise die Druckverteilung im Bugbereich des



Luftschiffs nicht wiedergeben und liefern falsche Resultate im Kurvenflug. Daneben fehlt in der Literatur eine vollständige und durchgängige Abhandlung der verteilten aerodynamischen Kräfte und Momente beim Flug durch stationäre wie auch instationäre Windfelder. Die Formulierung der dabei auftretenden instationären aerodynamischen Kräfte und ihre Wechselwirkung mit den Bewegungsgleichungen muss sehr vorsichtig erfolgen. Bis heute findet man hier inkonsistente Formulierungen, bei denen Effekte teilweise doppelt oder gar nicht berücksichtigt sind. Für den geschlossenen Körper gibt hier Thomasson Lösungen an [40].

Die um 1990 publizierten Modelle von Gomes [24] basieren auf umfangreichen stationären und dynamischen Windkanalmessungen. Infolge der Größenordnung der instationären aerodynamischen Kräfte im Vergleich zu den auftretenden Trägheitskräften sind die Ergebnisse solcher Windkanalversuche leider nur von geringer Qualität.

Wie den analytischen und experimentellen Verfahren sind auch den numerischen Methoden enge Grenzen gesetzt. Die Rumpfaerodynamik ist bereits bei geringen Anstell- oder Schiebewinkeln durch Ablösewirbel entlang des Rumpfes und die Nachlaufströmung im Heckbereich dominiert. Diese Effekte können selbst mit modernen CFD-Verfahren nur schwer erfasst werden. Zusätzlich befinden sich die Leitwerke im Bereich der Ablöselinie und je nach Konfiguration des Schiffes auch die Antriebe. Dadurch wird die Komplexität des Strömungsbildes weiter erhöht. Erst in jüngster Zeit findet man Veröffentlichungen mit Resultaten numerischer Strömungssimulationen [29], [30]. Diese Forschungsarbeiten, motiviert durch Studien für den neuen Zeppelin NT und die Lotte-Projekte, untersuchen sorgfältig die reibungsbehaftete Umströmung von Luftschiffrümpfen ohne Berücksichtigung der Leitwerke, die Simulationsresultate werden mit Windkanalmessungen validiert.

Während sich für U-Boote ein Satz von Bewegungsgleichungen etabliert hatte [18] war deren Formulierung unter den Luftschiff-Flugmechanikern noch 1977 uneinheitlich und fehlerhaft [19]. 1979 veröffentlichten DeLaurier und Schenk ihr Papier über die dynamische Stabilität von Luftschiffen. Darin stellten sie die linearen Bewegungsgleichungen getrennt für die Längs- und Seitenbewegung auf und bestimmen dann analytisch die Eigenformen der Bewegung [20]. In demselben Jahr wurden in [21] Resultate von nichtlinearen Flugsimulationen des Heavy Lift Airship präsentiert. Der Endbericht zu dieser Studie befasst sich dann ausgiebig mit der Formulierung der Bewegungsgleichungen [22]. Es folgen weitere Veröffentlichungen zum Thema Modellierung und Bewegungssimulation. Wie bereits angesprochen sind die Bewegungsgleichungen von Luftschiffen infolge der aerodynamischen scheinbare Masse Effekte direkt mit den aerodynamischen Kräften verkoppelt. Aus diesem Grund existieren nach wie vor unterschiedliche Formulierungen der Bewegungsgleichungen, je nach Ausrichtung und Aufbau des aerodynamischen Modells. Darstellungen welche an die Flugmechanik von Flächenflugzeugen angelehnt sind geben beispielsweise Jones in [15] oder Jex in [49] und auch der Autor in Zusammenarbeit mit Anderen in [61], [62] oder [63]. Etwas gewöhnungsbedürftigere Formulierungen, bei denen die kinematischen Starrkörperterme und die scheinbare Masse Anteile en bloc berücksichtigt sind, benutzen Masefield und Simpson in [48], Gomes in [24] und Thomasson in [40].

Das dynamische Eigenverhalten von Luftschiffen im symmetrischen Horizontalflug wird von DeLaurier und Schenk [20], Gomes [24] wie auch von Well und vom Autor [66], [67] diskutiert. DeLaurier stellt die Eigenformen durch Zeigerdiagramme dar und untersucht die Stabilität dreier Luftschiffe bei fester Fluggeschwindigkeit mit Hilfe von Wurzelortskurven, während Gomes den Einfluss der Fluggeschwindigkeit untersucht, dabei jedoch nur Geschwindigkeiten oberhalb der Ruderumkehr berücksichtigt. Ohnehin ermöglichen diese

auf festen Datentabellen beruhenden Modelle keinen tiefen Einblick in die Zusammenhänge zwischen Modellparameter und statischen wie dynamischen Eigenschaften der Luftschiffe zu geben.

Zum Thema Regelungsentwurf von Luftschiffen existieren wenig ernstzunehmende Veröffentlichungen. Einige jüngere Luftschiffkonstruktionen besitzen ein Fly by Wire oder Fly by Light System und ermöglichen dadurch die Implementierung von Flugreglern. Zu diesen Projekten gehören die Sentinel 1000 des britischen MOD, die entwickelte aber nicht fertiggestellte Sentinel 5000, der Zeppelin NT 07 oder auch das Luftschiff Joey der Firma Cargo-Lifter. Dem Autor sind jedoch keine Publikationen zu diesen Projekten und der dabei realisierten Flugregelsystemen bekannt. Es gibt einige akademische Konzeptstudien zur Regelung, so zum Beispiel von Well und vom Autor [66],[67] oder von Naghabushan [71]. Es fehlen eine grundsätzliche Analyse der Funktionalität eines Flugregelsystems für Luftschiffe sowie Kriterien zur Bewertung der Entwürfe.

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung eines durchgängigen analytischen Modells der Flugmechanik von Luftschiffen und dessen Anwendung zur Untersuchung stationärer und dynamischer Flugeigenschaften sowie zum Entwurf eines einfachen Flugregelsystems.

Der Schwerpunkt der Modellentwicklung soll dabei auf einer analytischen Formulierung der längsverteilter aerodynamischer Kräfte liegen, welche die Wirkung sowohl stationärer wie auch instationärer Windfelder erfasst. Die scheinbare Masse Kräfte im beschleunigten und im Kurvenflug sollten ebenfalls über das Luftschiff verteilt berücksichtigt werden. Der verteilte Ansatz wird gefordert, um über die Schiffslängsachse inhomogene Windfelder berücksichtigen zu können. Die geschlossene analytische Modellbeschreibung soll die Untersuchung des Einfluss von Luftschiffgeometrie und Konfigurationsparametern auf Flugeigenschaften ermöglichen. Sind solche Untersuchungen nicht algebraisch durchführbar, sollen die Modelle effiziente numerische Untersuchungen ermöglichen.

Weiter untersucht die vorliegende Studie die Flugleistung von Luftschiffen und stellt deren Flugenveloppe in Funktion der Fluggeschwindigkeit und für unterschiedliche Konfigurationen (Variation der statischen Schwere des Luftschiffs) dar. Auch in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit sollen die Stabilität und die Eigenbewegungsformen untersucht, und deren Empfindlichkeit auf Parameterschwankungen oder -unsicherheiten analysiert werden. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten soll der gesamte Geschwindigkeitsbereich, insbesondere auch Geschwindigkeiten unterhalb der Ruderumkehr, berücksichtigt werden. Basierend auf den Erkenntnissen der Modellanalyse sollen schließlich Regelungskonzepte vorgeschlagen werden.

Aus der Zielsetzung ergibt sich die folgende Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit:

*Kapitel 2* und *3* widmen sich der mechanischen und aerodynamischen Modellbildung. Nachdem die Bewegungs- und Steuergrößen definiert sind werden die Bewegungsgleichungen des Luftschiffs bezüglich eines frei wählbaren körperfesten Referenzpunkts formuliert. Das Luftschiff wird dabei als starrer Körper modelliert. Unter Ausnutzung der im späteren Aerodynamikkapitel hergeleiteten Struktur der Aerodynamikterme können die

Bewegungsgleichungen nach den Beschleunigungen aufgelöst werden. Weiter werden in *Kapitel 2* nach der Definition der Systemgrenzen die wirkenden äußeren Kräfte der Aerostatik und des Gewichts, sowie die Schubkräfte beschrieben.

In *Kapitel 3* wird dann das Modell der aerodynamischen Kräfte bereitgestellt und diskutiert. Die Aerodynamik wird in Anlehnung an frühere Arbeiten in ein Rumpf- und ein Leitwerkssegment unterteilt. Im Rumpfmodell werden potentialtheoretische Strömungsanteile neu über die Abbildung der Lösung der Potentialströmung um Rotationsellipsoide berücksichtigt, viskose Kräfteanteile über Längs- und Querströmungswiderstandsmodelle. Die Leitwerke werden mit Hilfe der Traglinientheorie und ebenfalls eines Längs- und Querströmungswiderstandes beschrieben. Alle Modelle berücksichtigen lokale Anströmungsbedingungen resultierend aus der Bewegung in 6 Freiheitsgraden und den örtlichen Windkomponenten. Die Darstellung der längsverteilt, potentialtheoretischen Rumpfkkräfte stellt dabei einen zentralen Teil der Arbeit dar. Die Kräfte infolge stationärer Bewegung, infolge beschleunigter Flugbewegung aber auch infolge stetigem wie beschleunigtem Wind werden sowohl längsverteilt als auch in integraler Beiwerteschreibweise angegeben. Zur Vertiefung dieser Diskussion sind in *Anhang B* die Rumpfkkräfte über die Theorie Schlanker Körper, ebenfalls in Abhängigkeit aller Bewegungsfreiheitsgrade und eines beliebigen in Ort und Zeit beschriebenen Windfeldes, hergeleitet.

Weiter werden Teilmodelle und das Gesamtmodell unter unterschiedlichen Anströmungsbedingungen ausgewertet. Die Kräfte werden in Beiwerteschreibweise formuliert, im Anhang sind die aerodynamischen Derivativa dann algebraisch dargestellt. Abschließend wird ein Abgleich des Modells mit Windkanaldaten des Luftschiffs Lotte durchgeführt.

Die Untersuchung des Flugverhaltens ist in *Kapitel 4* zusammengefasst. Als erstes werden die stationären Flugzustände Geradeausflug und Kurvenflug analytisch untersucht. Dies ermöglicht Aussagen über die Flugleistung in der Vertikalebene sowie im Kurvenflug. Zur Darstellung der Flugenveloppe von Luftschiffen wird ein Diagramm eingeführt. Die nachfolgenden Unterkapitel befassen sich mit der linearen Dynamik in der Umgebung des stationären Geradeausfluges. Die algebraische Herleitung der linearen Gleichungen und der Stabilitätsderivativa zeigt *Anhang C*. Im Bericht findet man ausführliche Diskussionen der Eigenbewegungsformen in Abhängigkeit von Fluggeschwindigkeit und variierenden Parametern. Diese Untersuchungen schließen Stabilitäts-, Mess- und Steuerbarkeitsaspekte mit ein. Abschließend wird das nichtlineare Flugverhalten vorgestellt.

*Kapitel 5* nutzt die flugmechanischen Erkenntnisse aus der Systemanalyse für die Auslegung von Flugreglern. Nach einer Diskussion der Regelungsaufgaben und -ziele werden nach klassischen Entwurfsmethoden je ein Regler für die Längs- und Seitenbewegung entwickelt. Nichtlineare Simulationen des geregelten sowie des ungeregelten Fluges durch Windfelder unterschiedlicher Wellenlängen runden die Untersuchung ab.

*Kapitel 6* enthält die abschließende Zusammenfassung. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit werden noch einmal aufgeführt und beurteilt. Als Ausblick werden noch offene, kritische und interessante Probleme angesprochen.