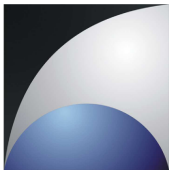




Technische
Universität
Braunschweig

Institut für
Raumfahrtssysteme



R XXXX X (beim Betreuer beantragen!) Auslegung einer Grid Fin Aktuatorik für wiederverwendbare Raketen

Institut für Raumfahrtssysteme

Ole Scholz

18. Mai 2021

Aufgabenstellung

Die Originalaufgabenstellung ist bei Studienarbeiten dem ungebundenen Institutsexemplar beizufügen, bei Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten dem gebundenen Exemplar zur Vorlage bei der Fakultät. Die Aufgabenstellung bei Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten wird vom Fachbereich ausgegeben (bei CSE-Masterarbeit vom CSE Office), dieser registriert den Beginn und die Abgabe der Arbeit und stempelt diese Angaben auf das letzte Blatt der Original-Aufgabenstellung.

Eine Diplom-, Studien-, Bachelor- bzw. Masterarbeit soll zeigen, dass man in der Lage ist, in begrenzter Frist eine Aufgabe nach wissenschaftlichen Methoden selbständig zu bearbeiten.

Die Aufgabenstellung kann Literaturhinweise enthalten, die als Einstieg in die Aufgabe gedacht sind. Es wird erwartet, daß weitere Literatur selbständig gesammelt wird (Bibliotheken der TU, des Instituts, etc.).

Wichtig: Schriftverkehr mit Dritten bei Nennung des die Arbeit betreuenden Instituts bedarf der vorherigen Genehmigung.

In der Abgabeverision dann dieses Blatt entfernen und an dieser Stelle durch die Aufgabenstellung ersetzen!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die nachfolgende Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Literatur angefertigt habe.

Datum, Unterschrift

Übersicht

Die Übersicht enthält kurz gefasste Angaben über die Zielsetzung, die angewandten Methoden und die gewonnenen Ergebnisse. Sie soll das Wesentliche aus dem Inhalt der Arbeit in wenigen Sätzen zusammenfassen und ist der eigentlichen Arbeit voranzustellen (höchstens 1/2 bis 1 Seite). Sie soll also nicht lediglich die Aufgabenstellung wiedergeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	7
1.1	Grid Fins als Steuerelement von Flugkörpern im Hyperschall	7
1.1.1	Aufbau	7
1.1.2	Strömung durch Grid Fins	9
1.1.3	Aerodynamische Beiwerte und Vergleich zu planaren Finnen	10
1.1.4	Grid Fin Varianten	14
1.2	Bisherige Implementierung	20
1.3	Das Air-Launchsystem Valkyrie	20
2	Modellentwurf	21
2.1	Systemanforderungen	21
2.1.1	Leistungsanforderungen	21
2.1.2	Anforderungen an die Kosten	21
2.1.3	Thermische Anforderungen	21
2.1.4	21
2.2	Morphologischer Kasten	21
2.3	Komponentenrecherche und -auswahl	21
2.3.1	Gitterdesign	21
2.3.2	Aktuator	21
2.3.3	Getriebe	21
2.3.4	Peripherie	21
2.4	Festlegung des Modelldesigns	21
2.5	Modellierung des Modells	21
3	Systemanalyse	22
3.1	FEM-Analyse	22
3.2	Betriebssimulation	22
3.3	Systemoptimierung	22
3.4	Systembewertung	22
3.5	Fazit	22
4	Zusammenfassung und Ausblick	23
	Literaturverzeichnis	24
	Abbildungsverzeichnis	24
	Tabellenverzeichnis	26
	Symbolverzeichnis	27

1 Grundlagen

1.1 Grid Fins als Steuerelement von Flugkörpern im Hyperschall

1.1.1 Aufbau

Um Grid Fins und ihre Orientierung beschreiben zu können, werden zunächst einige Größe eingeführt. In der simpelsten Konfiguration bestehen Grid Fins aus einem äußeren Rahmen, der die innere Struktur von sich kreuzenden planaren Flächen stützt. Dieser einfache Aufbau gewährt hohe Stabilität bei vergleichsweise geringem Gewicht [1] und lässt sich mittels 5 Parameter, wie in Abbildung 1.1 zu sehen, beschreiben. Die Wanddicke d kann sich für den Rahmen (d_R) von der des Gitters (d_G) unterscheiden. Aber auch innerhalb dieser Einteilung kann der Wert variieren. So ist häufig die Wandstärke in der Nähe der Einspannung erhöht, um die dort auftretenden höheren Beanspruchungen zu ertragen. Ein von den Wänden umrahmter Durchlass des Gitters wird als Zelle bezeichnet und seine Abmessung kann mit die Zellgröße f beschrieben werden. Die Ausmaße der Grid Fins werden maßgeblich durch die Spannweite b und die Höhe h bestimmt. Die Querschnittsfläche A steht in der Ausgangsstellung senkrecht zur Anströmung und wird vom Rahmen begrenzt. Normal zu dieser Fläche steht die Sehne mit einer im Vergleich zur planaren Finne deutlich kürzeren Länge s .

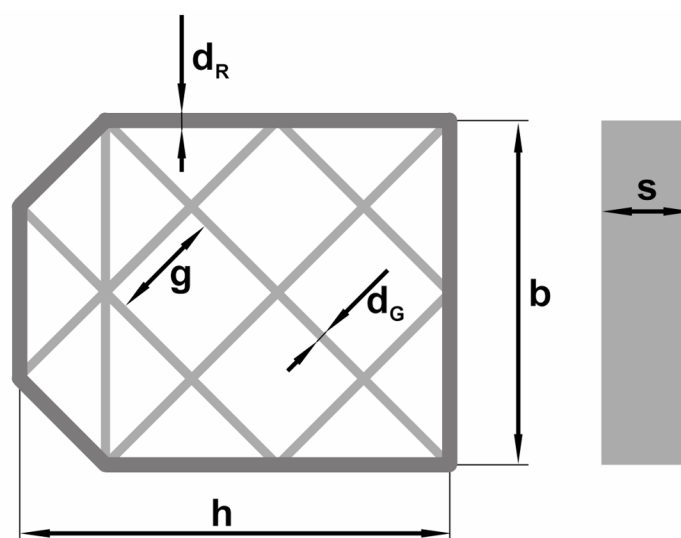


Abbildung 1.1: Aufbau eines einfachen Grid Fins

Grid Fins müssen nicht starr an einem Flugkörper, zum Beispiel der Rakete, befestigt werden, sondern können um mehrere Achsen drehbar sein. Um sie für den Transport kompakt zu lagern, lassen

sie sich an den Körper anlegen. Der Klappwinkel Λ beschreibt den Ausschlag um eine den Körper an der Anbringung tangierende Achse. Ein Klappwinkel von 0° entspricht hierbei dem normalen in die Strömung ragenden Zustand und 90° dem eingeklappten. Zur Steuerung lassen sich die Grid Fins um eine Achse, die orthogonal aus dem Körperoberfläche durch die Mitte des Grid Fins zeigt, verstellen. Ein Steuerwinkel von $\eta = 0^\circ$ ist auch hier wieder die Ausgangsstellung, die Sehne ist parallel zur X-Achse. Bei $\eta = 90^\circ$ würde also die Seitenkante zur Anströmung zeigen. Die Querschnittsfläche A und somit also auch das Gitter wird nicht durchströmt.

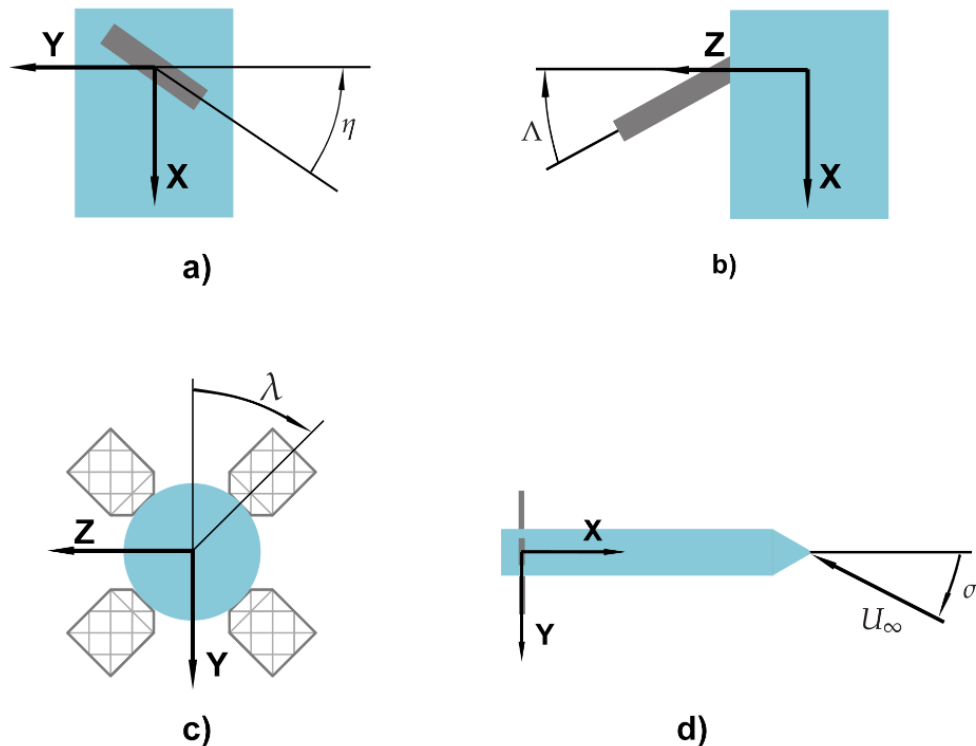


Abbildung 1.2: Winkel zur Beschreibung der Orientierung der Grid Fins zum Körper

a) Steuerwinkel, b) Klappwinkel, c) Drehwinkel, d) Neigungswinkel des Körpers zur Anströmung

Um die Aerodynamik zu untersuchen reichen diese Winkel nicht aus, da die Anströmung nicht parallel zur Rakete liegen muss. Der Neigungswinkel des gesamten Moduls zur Anströmung σ setzt sich unter realen Bedingungen mit Vernachlässigung des Windes aus dem Schiebewinkel und dem Bahnneigungswinkel zusammen. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ist eine solche Aufteilung aber irrelevant. Damit aber keine Informationen und somit Genauigkeit verloren geht, wird stattdessen die Orientierung der Grid Fins auf dem Umfang betrachtet. Verwendet wird hier eine Anordnung von vier gleichmäßig verteilten Steuerelementen. Das Koordinatensystem ist so definiert, dass es seinen Ursprung genau in der Mitte dieser Konfiguration hat und die positive X-Achse zur Spitze des Flugkörpers, also entgegen der Anströmung, zeigt. Bei $\sigma \neq 0$ zeigt auch die Y-Achse einem Anteil der Strömung entgegen. Die Z-Achse ist folglich nach dem Rechtssystem orthogonal zu den anderen beiden ausgerichtet. Um nun die Orientierung der Grid Fins um die X-Achse herum beschreiben zu können wird der Rollwinkel λ eingeführt. Wenn eine '+'-

Konfiguration vorliegt, befinden sich die einzelnen Finnen auf den Koordinatenachsen (X, Y) und der Rollwinkel ist gleich null. Im Gegensatz dazu sind sie bei der 'x'-Konfiguration um einen Winkel von $\lambda = 45^\circ$ verdreht. Der Anstellwinkel α , den ein einzelner Grid Fin erfährt, lässt sich aus dem Neigungswinkel des Körpers und, in Abhängigkeit vom Rollwinkel und welcher der Finnen betrachtet wird, aus dem Klapp- und Steuerwinkel bestimmen.

1.1.2 Strömung durch Grid Fins

Um die Eigenschaften von Grid Fins analysieren zu können, ist es nötig die zugrunde liegenden strömungsmechanische Vorgänge zu verstehen. Dazu wird in diesem Abschnitt das Verhalten der Strömung im Unter-, Überschall und besonders auch im transsonischen Bereich mit Schwerpunkt auf die dort wirkenden Verdichtungsstöße besprochen. Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Unterschall haben Grid Fins auf Grund ihrer geringen Dicke keinen großen Einfluss auf das Fluid, welches nahezu ungestört durch das Gitter fließen kann [2]. Mit steigenden Machzahlen macht sich jedoch zunehmend der Effekt einer um die stumpfe Vorderkante des Gitters herum in die Zelle hinein expandierende Strömung bemerkbar. Zusammen mit der Grenzschichtbildung an den Zellwänden, die effektiv zu Verengung der durchströmten Fläche führt, wird die Strömung innerhalb der Zellen auf Geschwindigkeiten beschleunigt, die über der Anströmung liegen [3].

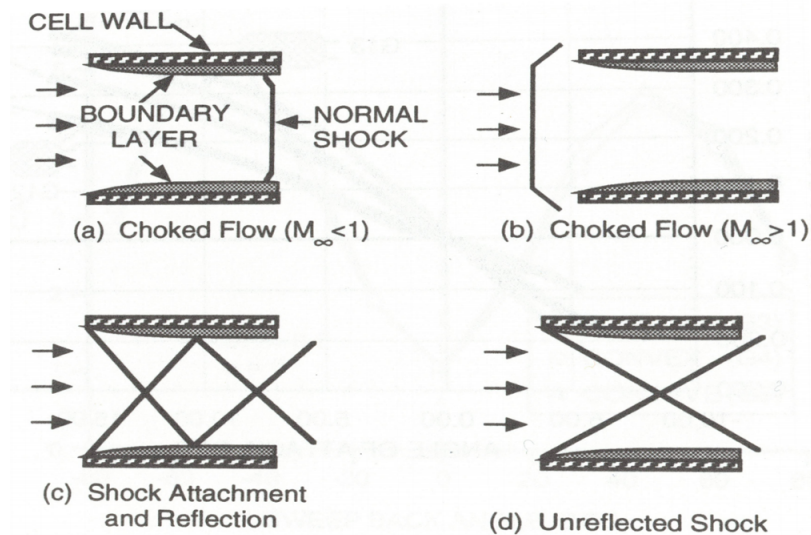


Abbildung 1.3: Stoßsystem einer Zelle aus [3]

Der transsonische Bereich wird ab einer Anströmungsmachzahl von circa $Ma_\infty = 0,8$ erreicht [4] und stellt für die Aerodynamik der Grid Fins eine bedeutsame Problematik dar. Sobald die Strömung innerhalb des Gitters eine Machzahl von 1 überschreitet, kommt es zu einem Verdichtungsstoß am Ausgang der Zellen, der mit steigender Machzahl an Stärke zunimmt. Dieser führt zu einer Drosselung der Strömung, was zur Folge hat, dass ein Teil der Strömung verdrängt wird und sich stattdessen um den Grid Fin herum bewegt. Steigt nun auch Ma_∞ über 1 löst sich der Stoß von den Gitterwänden und verbindet sich zu einer unregelmäßigen 3D-Struktur im Nachlauf [5]. Wächst

Ma_∞ weiter an, so kommt es zu einem Verdichtungsstoß vor dem Grid Fin. Dies führt dazu, dass innerhalb der Zellen keine Drosselung mehr vorliegt [5], stattdessen wird die Strömung schon durch den Stoß vor dem Gitter um dieses herum verdrängt [3]. Von den Vorderkanten gehen Schockwellen aus, die auf benachbarte Wände treffen und von ihnen reflektiert werden [3]. Steigt die Machzahl weiter an, so befinden sich diese Wellen auf steileren Bahnen bis sie gar nicht mehr auf die anderen Wände treffen. Des Weiteren nähert sich der Verdichtungsstoß vor dem Grid Fin diesem mit größer werdenden Strömungsgeschwindigkeiten immer weiter an, bis es abgesehen von der direkten Umgebung der Wände zu keinem Stoß mehr kommt. Die einzelnen Zellen fungieren nun als Überschalldüse [5], sodass die Strömung in den meisten Bereichen nicht mehr auf den Unterschall abgebremst wird. Der Stoß wurde vom Gitter "verschluckt".

Als ein besonderer Bereich ist noch die Ansatzregion zu betrachten, in der der Grid Fin an der Rakete angebracht ist. Ein Problem ist, dass Schnittstellen von Wänden ein erhöhtes Potenzial für blockierte Strömung darstellen. In der Ansatzregion befinden sich nicht nur vielen von diesen, sondern auch die Wanddicke ist hier meistens am größten. Dies in Kombination mit einer schon durch die Grenzschichtwirkung des Körpers verzögerte Strömung, führt zu einer relativ großen Region verlangsamer Strömung oder gar Rückströmung, die mit der Machzahl an Größe gewinnt [5]. Bei einer Machzahl von ungefähr $Ma_\infty = 2$ erreicht sie jedoch ein Maximum, da die Strömung bei weiter steigenden Geschwindigkeiten von der umgebenden mitgerissen wird und jene Region somit wieder an Größe und Bedeutung verliert [5].

Es ist nun also hervorzuheben, dass Grid Fins weder im Unterschall noch im hohen Überschall übermäßig starke Störungen der Strömung bewirken. Im transsonischen Bereich jedoch kommt es zu massiven Verdichtungsstößen, die zu einer starken Drosselung des Fluids führen.

1.1.3 Aerodynamische Beiwerte und Vergleich zu planaren Finnen

Nachdem nun die zugrunde liegende Strömung verstanden ist und Größen zur Beschreibung von Grid Fins etabliert wurden, werden nun die aerodynamischen Kräfte beschrieben und dabei der Vergleich zu den konventionellen planaren Finnen gezogen.

Relevant sind zum einen die Normalkraft, die orthogonal zur X-Achse, also in der X-Y-Ebene, liegen (F_N) und zum anderen die Axialkraft, die in negative X-Richtung zeigen F_X . In der Ausgangsstellung bei einem Neigungswinkel von $\sigma = 0$ entsprechen sie dem Auftrieb und Widerstand. Zusätzlich ist auch noch das Moment M_m um die Achse in der die Grid Fins steuerbar gelagert ist relevant.

Normalkraft

Die Normalkrafterzeugung ist ausschlaggebend für die Stabilität und Steuerbarkeit eines Flugkörpers. Die Steigung der Normalkraftkoeffizient über den Anstellwinkel $C_{N\alpha}$ bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 0$ ist in Abbildung 1.5 zu sehen. Wie in Abschnitt 1.1.2 beschrieben, führt die Drosselung im transsonischen Bereich dazu, dass die Strömung um den Grid Fin herum verdrängt wird. Dieser Anteil des Fluids kann nicht mehr zur Normalkrafterzeugung beitragen, sodass er einen nicht vernachlässigbaren Teil seiner Fähigkeit diese Kraft zu erzeugen einbüßt. Dieser Effekt ist genau gegensätzlich zu konventionalen planaren Finnen, die im Transschall ihren maximalen Normalkraftkoeffizienten C_N erreichen [3].

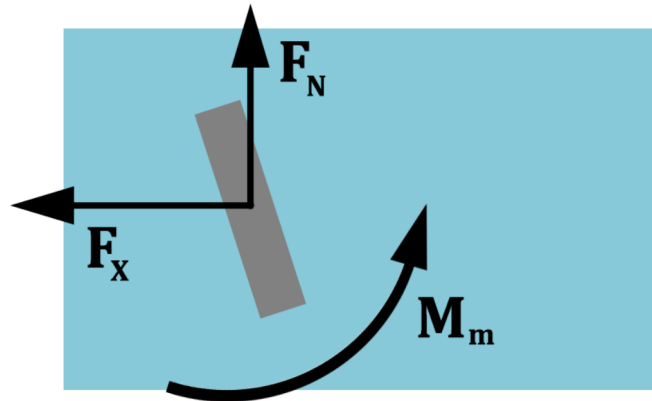


Abbildung 1.4: Kräfte und Momente am Grid Fin

Während vergleichbare konventionelle Finnen im Unterschall und niedrigen Überschall ähnlich hohe Normalkräfte erzeugen können, werden sie im hohen Machbereich von Grid Fins übertroffen. Schon ab $Ma = 2,5$ kann die Normalkraft das 1,5-fache betragen und dieser Wert steigt mit der Machzahl nur noch weiter an [3, 6].

Axialkraft

Die Axialkraft wird häufig als der größte Nachteil von Grid Fins angesehen, auch wenn er sich für spezielle Anwendungen sogar als “drag brake“ nutzen lässt. Wie schon im Abschnitt 1.1.2 erwähnt, wird die Strömung bei niedrigen Geschwindigkeiten nicht stark gestört, folglich kommt es auch nicht zu großen Axialkräften. Im transsonischen Bereich steigt der Beiwert durch die Drosselung der Verdichtungsstöße rasant an und erreicht bei einer Machzahl knapp unter 1 sein Maximum [7]. Danach nimmt der Wert wieder ab und bleibt im Überschall nahezu konstant, während er für planare Finnen abnimmt [6]. Generell kann die Axialkraft von Grid Fins das bis zu drei- oder vierfache des konventionellen betragen.

Gelenkmoment

Ein großer Vorteil von Grid Fins ist ihr geringes Moment um das Steuergelenk, welches den Einsatz von kleineren, weniger leistungsstarken Aktuatoren ermöglicht. Was wiederum eine Einsparung an Gewicht und Kosten mit sich bringt. Der Grund für das niedrige Moment ist hauptsächlich die im Vergleich zur planaren Finne deutlich kürzere Sehne, die der Luftkraft nur einen kleinen Hebelarm bietet. Der Druckpunkt befindet sich schon bei niedrigen Machzahlen in der Nähe der Mitte der Sehne, durch diese Mitte geht gleichzeitig die Achse, um die der Grid Fin gedreht wird, und wandert mit steigender Machzahl wenn auch nur leicht weiter Richtung 50% der Sehnenlänge [6]. Dies führt dazu, dass das Gelenkmomentbeiwert C_m mit steigender Machzahl abnimmt. Ebenso wie bei der Axialkraft befindet sich das Maximum bei Machzahlen knapp unter 1, wie in Abbildung 1.7 zu sehen. Auch für Variationen des Anstellwinkels bleibt der Beiwert durchgehend auf einem nied-

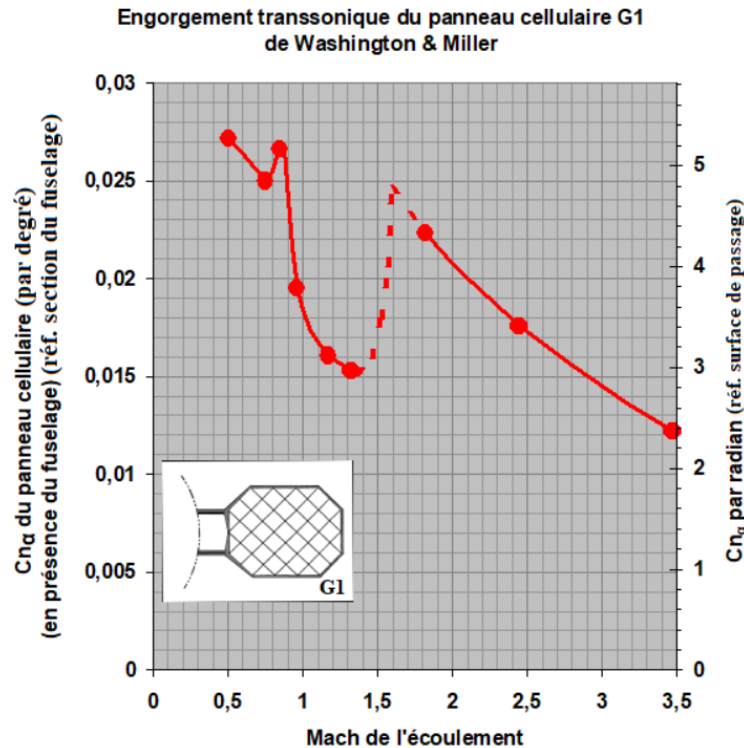


Abbildung 1.5: Normalkraftsbeiwertgradient bei $\alpha = 0$ in Abhängigkeit von der Machzahl aus [3]

rigen Niveau, deutlich unter dem seines planaren Gegenstücks [6]. Es sei hier jedoch anzumerken, dass es möglich ist eine planare Steuerfläche mit einem geringeren Moment zu erhalten, indem die Gelenkachse durch den Druckpunkt gelegt wird. Durch die große Druckpunktwanderung ist dies aber nur für einen kleinen vorher gewählten Machzahlengebiet dem Grid Fin überlegen, der über einen großen Geschwindigkeitsgebiet konstant gute Charakteristiken bietet.

Stabilität

Für die statische Stabilität eines Flugkörpers muss bei Neigungswinkeln $\sigma \neq 0$ ein Moment um den Schwerpunkt (SP) entstehen, das die Orientierung der Körperachse wieder parallel zur Strömung ausrichtet. Grid Fins haben hier einen entscheidenden Vorteil gegenüber planaren Alternativen, da bei ihnen auch die Finnen, die bei einem Rollwinkel von $\lambda = 0$ vertikal ausgerichtet sind, zu diesem Moment beitragen. Selbst der Effekt von Wirbel auf die lee-Finne ist dadurch negiert, dass sich die Variation des lokalen Anstellwinkels über die vergleichsweise große durchströmte Querschnittsfläche ausgleicht. Somit tragen die vertikalen Grid Fins über den gesamten Machbereich mit ungefähr 30% einen signifikanten Teil zur Stabilität bei [6]. Das Rückstellmoment um den Schwerpunkt ist sowohl im Unterschall als auch im Überschall größer, nur im Transschall büßen auch hier die Kräfte im Vergleich zur planaren Finne wieder ein.

Die Steuerbarkeit, die Fähigkeit Momente zu generieren, die die Orientierung des Flugkörpers aus der stabilen Lage heraus verändern, ist dadurch jedoch leicht behindert. Wenn zwei gegenüberliegende Grid Fins einen Steuerwinkelausschlag erfahren und somit eine Normalkraft erzeugen,

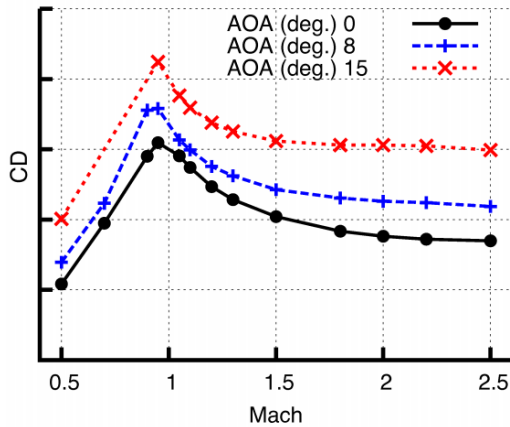


Abbildung 1.6: Axialkraft (hier C_D) bei unterschiedlichen Anstellwinkeln in Abhängigkeit von der Machzahl aus [7]

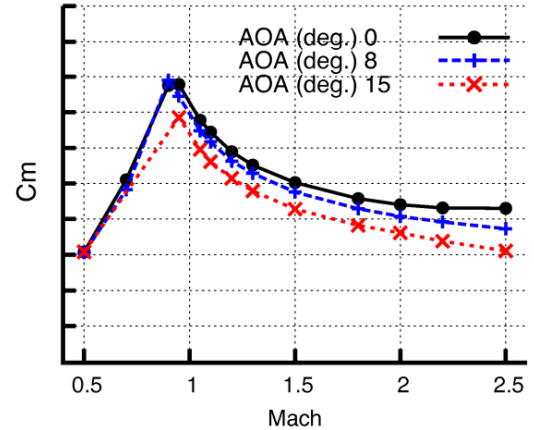


Abbildung 1.7: Gelenkmomentenbeiwert bei unterschiedlichen Anstellwinkeln in Abhängigkeit von der Machzahl aus [7]

wirken die anderen beiden dieser Kraft mit den soeben angesprochenen 30% entgegen.

Anstellwinkelcharakteristika

Im Gegensatz zu planaren Finnen, die bei hohen Anstellwinkeln Strömungsabriss erfahren, zeigen Grid Fins ein deutlich besseres Verhalten. Ihre kurze Sehne senkt die Gefahr der Strömungsablösung deutlich und erlaubt somit eine verlässlichere Normalkraftgenerierung, die sich auch noch bei moderaten Anstellwinkeln weiter steigern lässt. Somit liegt im Unterschall die maximale Normalkraft bei $\alpha = 40^\circ$ ohne jegliche Anzeichen von Strömungsabriss [3]. Des Weiteren ist der Anstieg dieser Kraft mit dem Anstellwinkel im Überschall bis zu Anstellwinkeln von mindestens $\alpha = 15^\circ$ beinahe linear [3], was eine sehr effektive Steuerung ermöglicht.

Die Axialkraft zeigt bei den meisten Machzahlen mit wachsendem Anstellwinkel ein ähnliches Verhalten wie die planaren Steuerflächen [6], deren Werte auch stark ansteigen.

In Bezug auf das Gelenkmoment M_m zeigen Grid Fins wieder ein überlegendes Verhalten gegenüber planaren Finnen, wie in Abbildung 1.9 zu sehen. Während im Unterschall der Anstieg des Momentes nur geringfügig weniger steil ausfällt und für beide Steuerflächen ab einem Winkel von $\alpha \approx 10^\circ$ beziehungsweise 15° zu stagnieren scheint, fällt der Unterschied im Überschall deutlich stärker aus. Die Kurve der planaren Finne zeigt einen rasanten Anstieg bei einer Anströmungsmachzahl von $Ma_\infty = 2,5$, die Steigung des Grid Fins ist jedoch für niedrige Anstellwinkel fast auf demselben Niveau, wie im Unterschall. Erst bei einem Anstellwinkel von circa $\alpha = 15^\circ$ nimmt auch hier die Steigung vergleichbare Werte an. Also ist die Steuerbarkeit bei hohen Machzahlen mit deutlich weniger Leistung möglich. Dies ermöglicht den Einsatz von bedeutend kleineren und somit auch kostengünstigeren Aktuatoren.

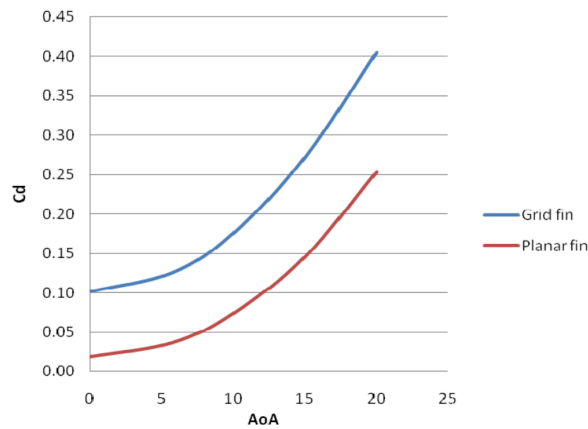


Abbildung 1.8: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α bei $Ma = 2,5$ aus [8]

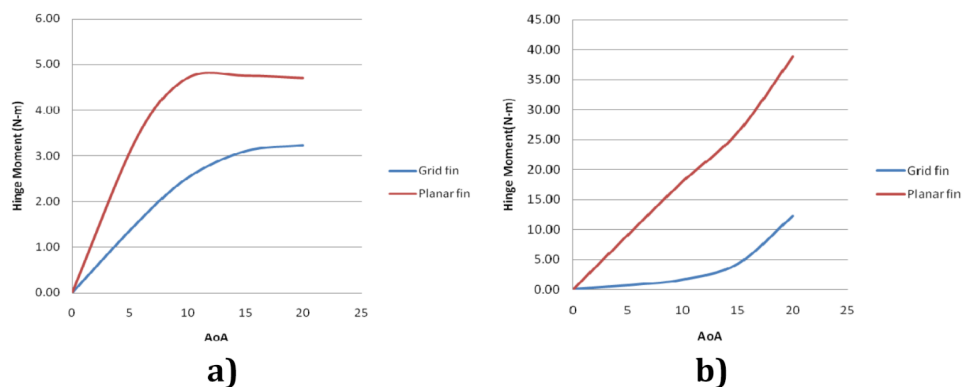


Abbildung 1.9: Gelenkmoment in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α bei a) $Ma = 0,5$, b) $Ma = 2,5$ aus [8]

1.1.4 Grid Fin Varianten

Bisher wurde nur eine sehr simple Version von Grid Fins betrachtet. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Variationen, die genutzt werden können, um die aerodynamischen Eigenschaften für bestimmte Anwendungen zu optimieren. In diesem Abschnitt werden einige Möglichkeiten beschrieben, wie diese unkonventionellen Finnen angepasst werden können eingegangen.

Pfeilung

Eine Häufige Kritik von Grid Fins sind ihre hohen Axial- bzw. Widerstandskräfte. Somit ist es nicht verwunderlich, dass ein Großteil der Forschung sich auf die Reduzierung dieses Aspektes konzentriert haben. Eine Häufig gewählte Methode ist hierbei die Pfeilung, deren Nutzen aus den planaren Tragflächentechnik schon seit längerer Zeit bekannt ist. Es wird in dieser Arbeit zwischen drei verschiedenen Varianten unterschieden, wie sich diese Pfeilung auf die komplexe Gitterstruktur übertragen lässt, unterschieden.

Die erste Variante stellt die **Pfeilung der gesamten Konfiguration** dar. Hierbei bleibt der Grid

Fin an sich unverändert. Stattdessen wird die Pfeilung dadurch erreicht, dass die Querschnittsfläche nicht senkrecht zur Oberfläche des Flugkörpers steht. Sie ist um den Pfeilungswinkel Λ_{Konf} , welcher identisch mit dem Klappwinkel Λ ist, geneigt. Da der Pfeilungswinkel dem Klappwinkel entspricht, wird direkt einen Vorteil dieser Variante offensichtlich. Der Pfeilungswinkel kann während des Einsatzes verstellt und den Strömungsbedingungen und Anforderungen der Flugphase angepasst werden.

Der Effekt ist hier aber nicht eine Reduzierung des Widerstandes, ganz im Gegenteil. Die Pfeilung erhöht die Axialkraft, sodass sie bei einem Winkel von $\Lambda_{Konf} = \pm 45^\circ$ ein neues Maximum erreicht. Hierbei bewirkt die Vorwärtspfeilung, negativer Winkel, sogar einen 10% stärkeren Effekt, als die Rückwärtspfeilung [9]. Somit kann eine Axialkraftsteigerung mit dem Faktor 5 im Unterschall, Faktor 3 im Transschall und im Überschall bei $Ma_\infty = 2,5$ wiederum Faktor 4 erreicht werden [9]. Zusätzlich ist die Axialkraft bei Pfeilungswinkel $\Lambda_{Konf} \neq 0$ im hohen Überschall nicht mehr unabhängig von der Machzahl, sondern steigt noch weiter an.

Die Normalkraftgenerierung ist jedoch auch reduziert. Bei maximaler Axialkraft beträgt die Normalkraft 30% bis 50% weniger also ohne Pfeilung. Bei kleinen Winkeln bis zu $\Lambda_{Konf} = \pm 20^\circ$ ist dieser Einfluss jedoch noch vernachlässigbar.

Eine Pfeilung der Konfiguration lässt also flexibel die Wirksamkeit der Grid Fins zur Anwendung als Drag Brakes variieren. Auch wenn für eine maximale Axialkraft die Steuerbarkeit stark beeinträchtigt wird, können, wenn der Bedarf an Widerstand es zulässt, bei kleinen Pfeilungswinkel weiterhin reguläre Beträge an Normalkraft generiert werden.

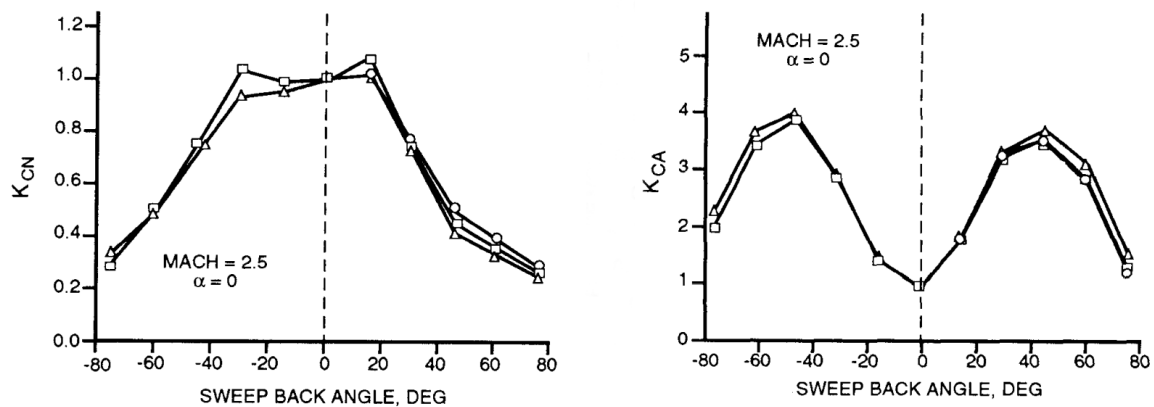


Abbildung 1.10: Vielfache des Normalkraftanstiegs (links) und der Axialkraft (rechts) im Vergleich zum ungepfeilten Grid Fin in Abhängigkeit vom konfiguellen Pfeilungswinkel Λ_{Konf} bei $Ma = 2,5$ und $\alpha = 0$ aus [9]

Die zweite Variante ist eine **Pfeilung des Gitters** entlang der Steuerachse, sodass die auf die Y-Z-Ebene projizierte Geometrie unverändert bleibt. Das Ziel hierbei ist es die Axialkraft zu senken, indem die Verdichtungsstöße an den Gittervorderkanten nicht alle auf derselben Höhe liegen, sondern in X-Richtung gestaffelt stattfinden, sodass die Schockwelle nicht senkrecht, sondern schräg auf der luv-Seite ist.

Mit steigender Pfeilung des Gitters Λ_G wächst die effektive Länge der Zellen, die als Düse fungieren. Der Stoß befindet sich somit näher an der Vorderkante und besitzt einen geringeren Winkel. Somit wird die Drosselung reduziert und die Expansionswellen am Zellausgang nehmen ab [11]. Dies sorgt

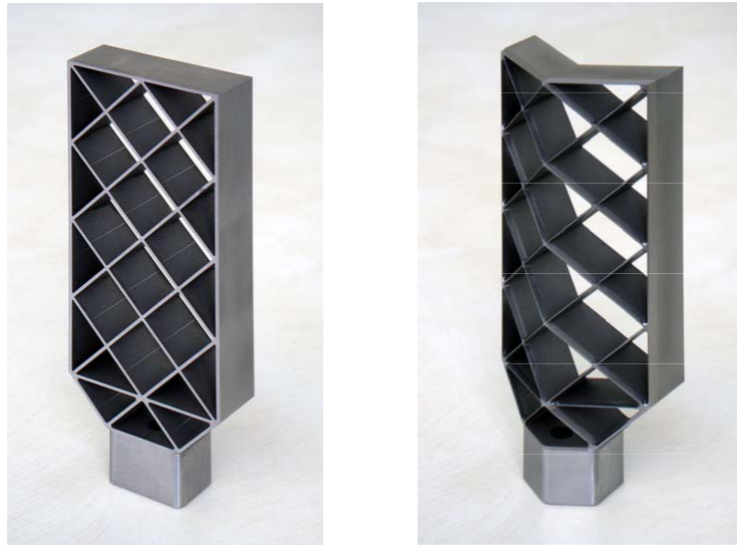
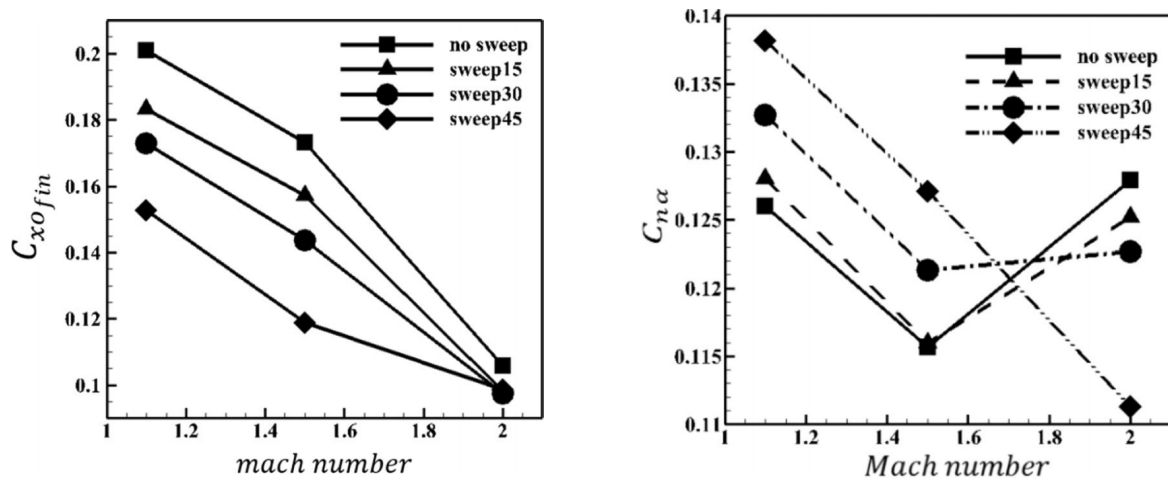


Abbildung 1.11: Ebener Grid Fin (links) und Grid Fin mit gepfeiltem Gitter (rechts) aus [10]

dafür, dass im Bereich der kritischen Machzahlen die Axialkraft deutlich verringert wird. Auch der Gradient der Normalkraft $F_{N\alpha}$ nimmt mit steigenden Pfeilungswinkel im transsonischen Bereich zu [11], was die Stabilität deutlich erhöht. Eine Vorwärtspfeilung $\Lambda_G < 0$ zeigt grundsätzlich ähnliche, wenn auch schwächere, Effekt wie die Rückwärtspfeilung [12]. Im Überschall lässt der Effekt auf die Axialkraft nach, sodass dieser vernachlässigbar wird. Für die Normalkraftgenerierung dreht sich die Wirkung der Pfeilung bei diesen Machzahlen sogar um, sodass schon bei $Ma_\infty = 2$ der ungepfeilte Grid Fin dem gepfeilten überlegen ist.

Eine Pfeilung des Gitters birgt also hauptsächlich für den Transschall Vorteile wie geringere Axialkraft und einen erhöhten Normalkraftanstieg. Bei höheren Machzahlen bewirkt die Pfeilung jedoch auch bei letzterem eine Senkung, wodurch die Stabilität im Überschall reduziert wird.

Abbildung 1.12: Axialkraftbeiwert (links) und Normalkraftbeiwertanstieg (rechts) in Abhängigkeit von der Machzahl bei unterschiedlichen Pfeilungswinkeln Λ_G und $\alpha = 0$ aus [11]

Als letzte Variante bleibt die **lokale Pfeilung der Zellwände** übrig. Diese kann man sich hierbei

wie nebeneinander gereihte Deltaflügel vorstellen, sodass die luv-Seite des Grid Fins mit Zacken übersät ist. Für die Beschreibung dieser Pfeilung wird nicht nur der Winkel Λ_Z , sondern auch die Anzahl der Zähne pro Zelle und ihre Position relativ zu den Schnittstellen des Gitters, benötigt. Im Folgenden wird nur der Fall von einem Zahn zwischen zwei Schnittstellen der Zellwände betrachtet und die Eigenschaften beziehen sich auf ein Gitter, deren Vorder- und Hinterkanten nicht wie bisher betrachtet stumpf, sondern zugespitzt, sind. Auf unterschiedliche Kantenformen wird später in diesem Kapitel noch eingegangen. Für die Position der Spitze werden zwei Typen unterschieden. Beim Tal-Typus befindet sich die Spitze in der Mitte der Zellwand, sodass sich an der Schnittstelle alle sich kreuzende Zellwände ein "Tal" teilen. Der Berg-Typus hingegen hat ein Tal in der Mitte und benachbarte Zellen teilen sich einen "Berg".

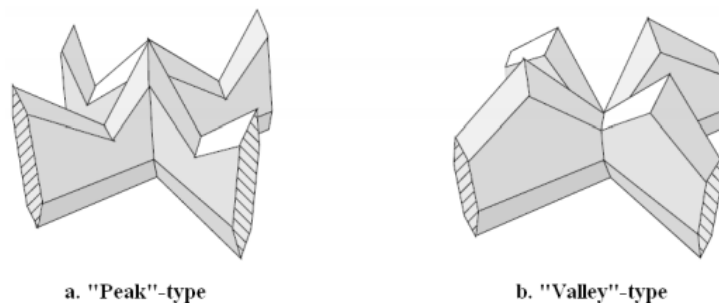


Abbildung 1.13: Lokale Pfeilung der Zelle mit dem a) "Berg"-Typus und b) "Tal"-Typus aus [13]

Trifft nun eine Strömung auf lokal gepfeilte Gitterwände, so bilden sich an der Vorderkante drei verschiedene Druckbereiche. An der Spitze und von dort aus im Machkegel strömungsabwärts befindet sich eine 2D-Strömung, in deren Gebiet ein geringerer Druck an der Oberfläche herrscht. Im Tal hingegen kommt es zu deutlich erhöhtem Druck, da die Schockwellen der Pfeilung folgen und sich somit die der benachbarten Zähne hier kreuzen. Während die Größe dieser beiden Zonen relativ unabhängig von der Zahngröße ist, wachsen und schrumpfen die Ausmaße des Bereiches mit abgeschwächter Wellenintensität zwischen ihnen mit ihr [13].

Wird nun zuerst eine einzelne planare Wand unendlicher Streckung mit lokaler Pfeilung betrachtet, so zeigt sich eine Abnahme der Axialkraft mit steigenden Pfeilungswinkel Λ_Z [13]. Je höher die Machzahl, dicker die Wandstärke und stumpfer die Vorderkante ist, desto stärker macht sich der Effekt bemerkbar. Im Gegensatz dazu verringert die Zahnlänge und der Anstellwinkel die Effektivität der lokalen Pfeilung [13].

Auch am Gitter reduzieren beide Typen von lokaler Pfeilung den Wellenwiderstand deutlich. Beim Tal-Typus treffen jedoch vier statt nur zwei Wellen aufeinander, sodass es zu größeren Verlusten kommt und die Widerstandsreduzierung beim Berg-Typus bei einer Machzahl von $Ma = 6$ um 1,2% stärker ist [13]. Wie in Abbildung 1.14 zu sehen haben lokal gepfeilte Grid Fins auch ein höheres Auftrieb zu Widerstand Verhältnis, jedoch ist ihr Vorteil hier geringer, als beim Widerstand sodass ein geringerer Auftrieb vorzuliegen scheint. Zusätzlich zeigt an dieser Stelle der Tal-Typus bessere Eigenschaften, da seine Auftriebserzeugung über der des Berg-Typus liegt.

Bei hohen Machzahlen lässt sich nun also mittels der lokalen Pfeilung der Zellwände, die Axialkraft auf Grid Fins stark vermindern. Dabei müssen jedoch leichte Einbußen in Bezug auf die Normalkraft in Kauf genommen werden.

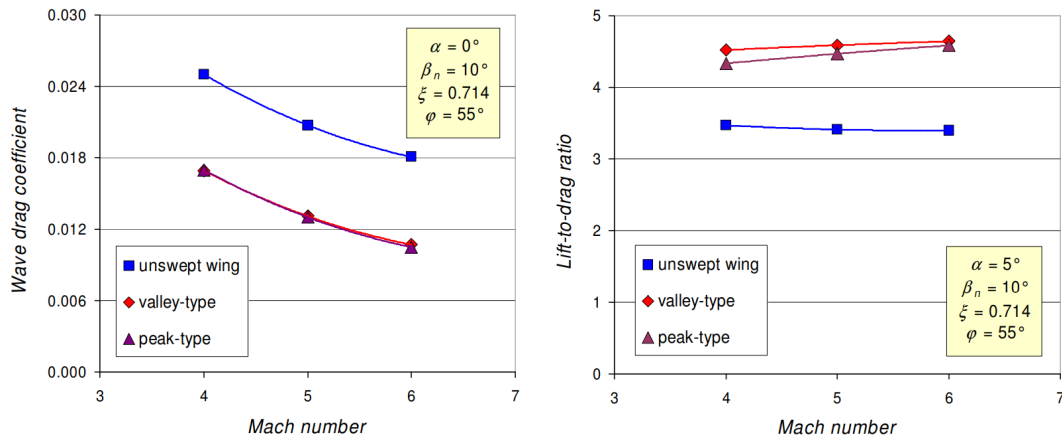


Abbildung 1.14: Widerstandsbeiwert (links) und Auftrieb/Widerstand-Verhältnis (rechts) in Abhängigkeit von der Machzahl aus [13]

Krümmung

Um das Transportpotenzial von Grid Fins am besten nutzen zu können, ist es wünschenswert, dass sie sich im eingeklappten Zustand an den Körper anschmiegen. Somit hätten sie, je nachdem ob sie in Flugrichtung ($\Lambda = -90^\circ$) oder entgegen ($\Lambda = 90^\circ$) gedreht werden, eine konkave oder konvexe Krümmung zur Anströmung, deren Radius dem vom Körper entspricht.

Dies hat unabhängig der Ausrichtung der Krümmung nur einen geringen Einfluss auf die Aerodynamik. Weder Axial- noch Normalkraft zeigen signifikante Änderungen [9], sodass die Leistungsfähigkeit erhalten bleibt. Beim Gelenkmoment zeichnen sich jedoch Unterschiede ab. Die konvexe Krümmung führt zu einem sehr kleinen Moment, dass sich für Anstellwinkel zwischen $\alpha = -10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ um die null bewegt [9]. Für den konkaven Grid Fin zeigt sich jedoch ein Anstieg des Gelenkmomentes mit dem Anstellwinkel, der steiler ist als der des flachen [9]. Hier sei jedoch anzumerken, dass sich die Werte noch immer in einem sehr niedrigen Bereich, deutlich unter planaren Finnen, bewegen.

Somit lässt sich mit einer Krümmung des Grid Fins, die der des Flugkörpers entspricht, die Transportmöglichkeiten ideal nutzen, ohne spürbare Einbußen in der Leistung zu haben.

Wandquerschnitt

Eine weitere Möglichkeit Grid Fins zu verändern ist die Variation des Wandquerschnitts und -dicke. Die Idee dahinter ist, dass die Strömung bisher schlagartig um eine stumpfe Vorderkante herum expandieren muss und somit große Axialkräfte bewirkt. Alternativ sind verschiedene Formen, wie zum Beispiel in Abbildung 1.15 (F2 bis F4) zu sehen, die das Fluid um eine spitze Kante herum lenken.

Aus dieser Grafik lässt sich auch direkt die Reduktion an Axialkraft für alle dargestellten Machzahlen erkennen. Des Weiteren wird gezeigt, dass eine höhere Wanddicke des Gitters d_G (F5) den Widerstand weiter steigert, was auch im Kontext einer stärkeren Verdrängung der Strömung Sinn ergibt. Ebenso führt ein dünnerer Rahmen d_R (F6) zu einer Minderung der Kraft. Diese Trends scheinen unabhängig von der Machzahl zu sein. Weiter Untersuchungen von Miller und Washing-

ton haben ergeben, dass diese Unterschiede auch bei Variation des Anstellwinkels erhalten bleiben [14].

Die Normalkraft wird bei einer Machzahl von $Ma_\infty = 0,7$ durch die Querschnittsform des Rahmens leicht beeinflusst. Über den gesamten Anstellwinkelbereich gibt es eine Variation von circa 10% aufgrund der Form [15]. Ein dickeres Gitter führt in Unterschall jedoch zusätzlich zu einer leichten Abnahme der Normalkraft für Anstellwinkel $\alpha > 10^\circ$ [15]. Bei kritischen Machzahlen und einem Anstellwinkel von $\alpha = 5^\circ$ erreicht die Reduktion mit 13% ein Maximum [15]. Im Überschall hingegen zeigt die erhöhte Wandstärke d_G sogar eine leicht gesteigerte Normalkraft und der Effekt der Form hingegen ist vernachlässigbar gering.

Der Druckpunkt lässt sich durch eine veränderte Querschnittsform für die Beispiele F3 und F4 um ungefähr 5% der Sehnenlänge s nach hinten verschieben. Die führt im Unterschall, wo der Druckpunkt noch in der Nähe der $l/4$ -Linie liegt, zu einer bemerkbaren Reduktion des Gelenkmomentes M_m und im Überschall, wo der Druckpunkt ohnehin schon bei 45% – 50% der Sehnenlänge liegt, zu Momenten, die für Anstellwinkel bis $\alpha < 10^\circ$ fast gleich null sind [15].

Mit einer gezielten Wahl des Querschnitts der Wände und Anpassung ihrer Dicke lässt sich die Axialkraft eines Grid Fins manipulieren, ohne Einbußen für Normalkraft und Gelenkmoment in Kauf nehmen zu müssen. Hierfür können sich unter bestimmten Bedingungen sogar auch positive Entwicklungen bemerkbar machen.

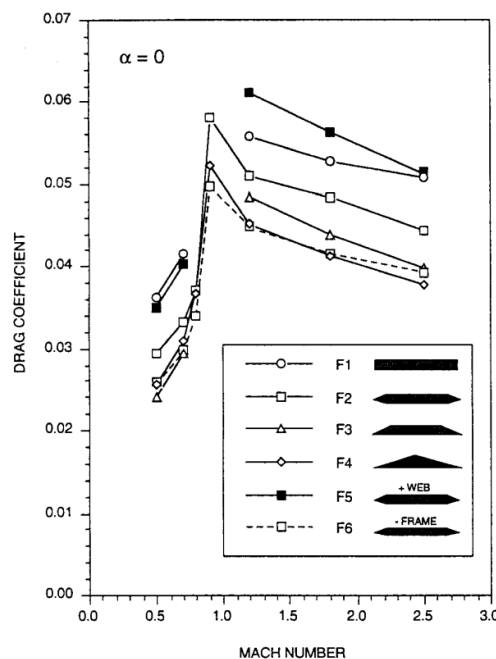


Abbildung 1.15: Widerstandsbeiwert für verschiedene Rahmenquerschnittsformen (F1-F4), einen dickeren Rahmen d_R (F5) und ein dünneres Gitter d_G (F6) bei $\alpha = 0$ in Abhängigkeit von der Machzahl aus [14]

Zellform

Für die Form der einzelnen Zellen sind unterschiedliche Varianten denkbar. Neben Rechtecken sind auch Dreiecke möglich, welche der Struktur eine noch höhere Stabilität verleihen. Alternativ

wäre für den idealen Durchlass der Strömung eine runde Zelle am besten, um die Axialkraft zu minimieren. Da mit Kreisen keine Fläche lückenlos füllbar ist, kann hier auf eine bienenwaben-ähnliche Sechseckstruktur also gut Näherung zurückgegriffen werden [15]. In Abbildung 1.1 ist auch schon eine Kombination unterschiedlich geformter Zellen zu sehen, was eine flexible Gestaltung der Gesamtgitterform ermöglicht.

Weder im Unter- noch im Überschall zeigen die unterschiedlichen Zellformen bei gleicher Gesamtquerschnittsfläche A einen signifikanten Unterschied in Bezug auf die Normalkraft und das Gelenkmoment [15]. Die Auftriebsfläche, der Anteil der Zellwände die orthogonal zur Y-Achse liegen, scheint somit keinen großen Einfluss auf den Auftrieb zu haben, da sie bei den Sechsecken deutlich geringer ist. Nur im Transschall machen sich wieder besondere Effekte bemerkbar. Der Normalkraftsbeiwertanstieg der Wabenstruktur ist in der Ausgangsstellung $\alpha = 0$ deutlich unter den Werten des Drei- und Viereckgitters [15]. Die Normalkraft steigt im Gegensatz zu dem nicht-linearen Verhalten der beiden anderen Zellformen bei den Sechsecken jedoch konstant an, sodass bei hohen Anstellwinkeln wieder kein wirklicher Unterschied bemerkbar ist [15].

Die Zellform hat folglich nur einen geringen Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften eines Grid Fins.

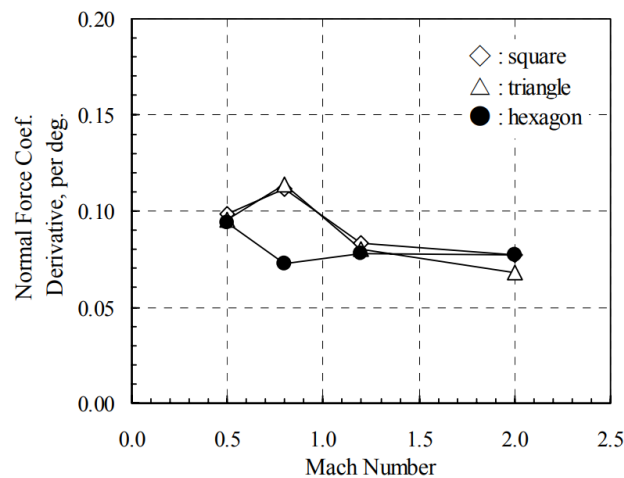


Abbildung 1.16: Anstieg des Normalkraftkoeffizienten in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α und der Machzahl für verschiedene Zellformen bei $\alpha = 0$ aus [15]

1.2 Bisherige Implementierung

1.3 Das Air-Launchsystem Valkyrie

2 Modellentwurf

2.1 Systemanforderungen

2.1.1 Leistungsanforderungen

2.1.2 Anforderungen an die Kosten

2.1.3 Thermische Anforderungen

2.1.4 ...

2.2 Morphologischer Kasten

2.3 Komponentenrecherche und -auswahl

2.3.1 Gitterdesign

2.3.2 Aktuator

2.3.3 Getriebe

2.3.4 Peripherie

z.B. Energieversorgung

2.4 Festlegung des Modelldesigns

2.5 Modellierung des Modells

3 Systemanalyse

3.1 FEM-Analyse

3.2 Betriebssimulation

3.3 Systemoptimierung

3.4 Systembewertung

3.5 Fazit

4 Zusammenfassung und Ausblick

In der Zusammenfassung (mindestens 1,5 Seiten) sollen die theoretische Herleitung und die wesentlichen Ergebnisse so aufgelistet werden, dass sie ohne Kenntnis der vorherigen Abhandlung verständlich sind. Dabei wird in der Vergangenheit geschrieben und die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit wiedergegeben.

Literaturverzeichnis

- [1] Fumiya Hiroshima and Kaoru Tatsumi. Grid pattern effects on aerodynamic characteristics of grid fins. In *24th International Congress of Aeronautical Sciences*, 2004.
- [2] Marco Debiasi, Zeng Yan, and Tat Chng. Swept-back grid fins for transonic drag reduction. 06 2010.
- [3] Mark S. Miller and Wm. David Washington, 1998.
- [4] Mark S. Miller and Wm. David Washington, 1998.
- [5] Montgomery Hughson, Eric Blades, Edward Luke, and Gregg Abate. Analysis of lattice grid tailfin missiles in high-speed flow. 06 2007.
- [6] G. M. Simpson, 1998.
- [7] James Kless and Michael Aftosmis. *Analysis of Grid Fins for Launch Abort Vehicle Using a Cartesian Euler Solver*.
- [8] Salman Munawa. Analysis of Grid Fins as Efficient Control Surface in Comparison to Conventional Planar Fins. In *27th international congress of the aeronautical sciences*, 2009.
- [9] WM. WASHINGTON, PAMELA BOOTH, and MARK MILLER. *Curvature and leading edge sweep back effects on grid fin aerodynamic characteristics*.
- [10] Marco Debiasi, Zeng Yan, and Tat Chng. Swept-back grid fins for transonic drag reduction. 06 2010.
- [11] Parisa dehghani and Miralam Mahdi. Numerical analysis of the effect of sweep-back angle on the stability derivatives of the grid fin. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 07 2019.
- [12] G Faza, H Fadillah, Faber Silitonga, and Mochammad Moelyadi. Study of swept angle effects on grid fins aerodynamics performance. *Journal of Physics: Conference Series*, 1005:012013, 04 2018.
- [13] Daniel Guyot and Erich Schüle. Novel locally swept lattice wings for missile control at high speeds. pages 1–15, 01 2007.
- [14] Mark Miller and Wm. Washington. *An experimental investigation of grid fin drag reduction techniques*.
- [15] Fumiya Hiroshima and Kaoru Tatsumi. Grid pattern effects on aerodynamic characteristics of grid fins. 2004.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau eines einfachen Grid Fins	7
1.2	Winkel zur Beschreibung der Orientierung der Grid Fins zum Körper a) Steuerwinkel, b) Klappwinkel, c) Drehwinkel, d) Neigungswinkel des Körpers zur Anströmung	8
1.3	Stoßsystem einer Zelle aus [3]	9
1.4	Kräfte und Momente am Grid Fin	11
1.5	Normalkraftsbeiwertgradient bei $\alpha = 0$ in Abhängigkeit von der Machzahl aus [3] . .	12
1.6	Axialkraft (hier CD) bei unterschiedlichen Anstellwinkeln in Abhängigkeit von der Machzahl aus [7]	13
1.7	Gelenkmomentenbeiwert bei unterschiedlichen Anstellwinkeln in Abhängigkeit von der Machzahl aus [7]	13
1.8	Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α bei $Ma = 2,5$ aus [8] . . .	14
1.9	Gelenkmoment in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α bei a) $Ma = 0,5$, b) $Ma = 2,5$ aus [8]	14
1.10	Vielfache des Normalkraftanstiegs (links) und der Axialkraft (rechts) im Vergleich zum ungepfeilten Grid Fin in Abhängigkeit vom konfigurellen Pfeilungswinkel Λ_{Konf} bei $Ma = 2,5$ und $\alpha = 0$ aus [9]	15
1.11	Ebener Grid Fin (links) und Grid Fin mit gepfeiltem Gitter (rechts) aus [10]	16
1.12	Axialkraftbeiwert (links) und Normalkraftsbeiwertanstieg (rechts) in Abhängigkeit von der Machzahl bei unterschiedlichen Pfeilungswinkeln Λ_G und $\alpha = 0$ aus [11] . .	16
1.13	Lokale Pfeilung der Zelle mit dem a) "Berg"-Typus und b) "Tal"-Typus aus [13]	17
1.14	Widerstandsbeiwert (links) und Auftrieb/Widerstand-Verhältnis (rechts) in Abhän- gigkeit von der Machzahl aus [13]	18
1.15	Widerstandsbeiwert für verschiedene Rahmenquerschnittsformen (F1-F4), einen di- ckeren Rahmen d_R (F5) und ein dünneres Gitter d_G (F6) bei $\alpha = 0$ in Abhängigkeit von der Machzahl aus [14]	19
1.16	Anstieg des Normalkraftkoeffizienten in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α und der Machzahl für verschiedene Zellformen bei $\alpha = 0$ aus [15]	20

Tabellenverzeichnis

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Querschnittsfläche der Grid Fins
C	Kräfte- /Momentenbeiwert
F	Kraft
M	Moment
U	Geschwindigkeit des Fluids
b	Spannweite der Grid Fins
g	Zellgröße, Abstand der Zellwände
h	Höhe der Grid Fins
s	Sehnenlänge

Griechische Buchstaben

Λ	Klappwinkel, Pfeilungswinkel (mit Index)
α	Anstellwinkel des Grid Fins zur Anströmung
η	Steuerwinkel
λ	Rollwinkel
σ	Neigungswinkel des Flugkörper zur Strömung

Indices

G	Gitter
$Konf$	Konfiguration
N	Normal zur X-Achse
R	Rahmen
X	In (negative) X-Richtung
Z	Zelle
m	Auf das Steuergelenk bezogen
α	Differenzialquotient über Anstellwinkel α
∞	Zustand der Anströmung

Abkürzungen

GAIA	German Association for Intercontinental Astronautics e.V.
COTS	Commercial off-the-shelf
LEO	Low Earth Orbit
MOAB	Massive Ordnance Air Blast
SP	Schwerpunkt

