

SmartFish, Analyse einer unkonventionellen Flugzeugkonfiguration

H. Pflugshaupt, K. Schafroth
Team SmartFish GmbH
Junkerngasse 43, CH-3011 Bern

Übersicht

Das Projekt SmartFish [1] entstand ursprünglich aus Analogieüberlegungen zwischen der Form von Flugzeugen und Fischen. Das Ziel ist eine neue integrierte Konfiguration für Kleinflugzeuge optimiert für hohe Unterschallgeschwindigkeit und grosse Reichweite, bei verringerten Herstell- und Betriebskosten. Die Konfiguration verspricht wesentliche Vereinfachungen der Zelle, enormes nutzbares internes Volumen, einen hohen Anteil Zuladung und damit eine hohe Transporteffizienz.

Eine grosse Rolle in der Entwicklung der Konfiguration spielen der computergestützte Entwurf (CAD) und die numerische Strömungssimulation (CFD).

Versuche mit Flugmodellen zeigten ungewöhnlich gute Flugeigenschaften und Flugleistungsberechnungen ergaben vielversprechende Resultate.

Hier wird die Konfiguration nach üblichen Gesichtspunkten analysiert. Im Gegensatz zum futuristischen Aussehen sind die Auslegungswerte nicht extrem. Leistungs-Abschätzungen versprechen gute Werte im Schnellflug. Unkonventionelle Vergleichsansätze zeigen die Beziehung zum konventionellen Flugzeugentwurf in einem neuen Licht.

Die Konfiguration hat einige interessante aerodynamische Besonderheiten aufzuweisen. Einige Resultate und Eigenschaften wurden mit Windkanalmessungen bestätigt und ergänzt.

Mögliche Anwendungen und Potentiale werden diskutiert.

1 Ursprung und Gestaltungsphilosophie

Das Projekt SmartFish entstand ursprünglich aus Analogieüberlegungen zwischen der Form von zukünftigen Flugzeugen und Fischen. Natürlich lässt sich diese Analogie nicht allzuweit treiben, denn eigentlich lässt sich die Art der Bewegung eines Fisches eher mit einem Luftschiff, als mit einem

Flugzeug vergleichen. Immerhin müssen Fische im Gegensatz zu Luftschiffen bei ihren oft heftigen Manövern auch grossen Auftrieb erzeugen können, was von Luftschiffen nicht gefordert wird. Ohne diese Analogieüberlegungen wäre der vorliegende Flugzeugentwurf kaum entstanden.

Ähnliche Überlegungen sind auch z.B. von Hertel [2] angestellt worden, die sich allerdings auf den Teilaспект Flugzeugrumpf beschränkt hatten.

Beim konventionellen Flugzeugentwurf wird das Flugzeug zuerst in Elemente zerlegt, diese Elemente, wie Flügel, Rumpf und Antrieb, werden sodann einzeln optimiert, dann zusammengesetzt und die Schnittstellen notdürftig mit Übergängen kaschiert. Damit ist die Gesamt-Konfiguration vorgegeben. Bei Gesamt-Optimierungen werden nur noch einzelne Parameter variiert. Im Fall des SmartFish wurde hingegen versucht, mit dieser althergebrachten Vorgehensweise zu brechen und einen integrierten Gesamtentwurf zu gestalten, der zusätzlich noch hohe ästethische Ansprüche erfüllen musste.

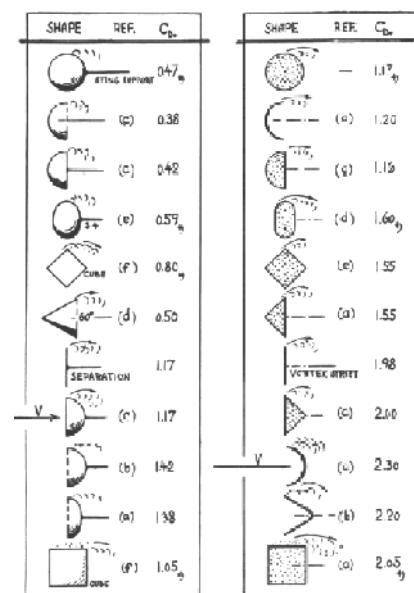


Bild 1 Widerstände von dreidimensionalen und zylindrischen Körpern [3]

Eine weitere Überlegung basiert auf der Tatsache, dass

dreidimensionale Körper wesentlich kleinere Widerstandsbeiwerte als entsprechende zweidimensionale aufweisen (siehe Bild 1). So beträgt der Widerstandsbeiwert einer Kugel (überkritisch) nur etwa 40% desjenigen eines querangeströmten Zylinders, bezogen auf die Querschnittsfläche. Wenn die Luft dreidimensional auf alle Seiten ausweichen kann, wird bei der Umströmung weniger Übergeschwindigkeit erzeugt, als wenn sie zweidimensional in parallele Ebenen gezwungen wird. Entsprechend kleiner fallen die Druckdifferenzen und damit indirekt der Widerstand aus, und entsprechend wird die kritische Machzahl höher sein.

Es wurde versucht, eine Konfiguration zu schaffen, die einem idealen Stromlinienkörper möglichst nahe verwandt sein und in jeder Hinsicht möglichst fliessende Konturen aufweisen sollte. Scharfe Kanten sind nur als Austrittskanten zulässig und Ecken nur an den Flächenenden. Die Erfahrung des Flugzeugbaus zeigen immer wieder, dass gute Formgebung bessere Resultate bringt, als extreme Verringerung von Querschnitten. Auf Abwickelbarkeit von Flächen wurde bewusst kein Wert gelegt, denn mit den heute zur Verfügung stehenden Baumethoden besteht kein Grund dazu.

Damit ein Flugzeug die Fähigkeit besitzt zu fliegen, muss die Zelle Auftrieb erzeugen können und dazu ist eine gewisse Grundfläche und vor allem Spannweite nötig. In der Evolution der Konfiguration wurde in diversen Vorentwürfen versucht, mit dem absolut nötigen Minimum an Spannweite auszukommen, um möglichst wenig zweidimensionale Umströmungen zu haben. Große Spannweiten sind für effizienten Langsamflug wichtig, für den Schnellflug hingegen ist eine kleine Spannweite genügend.

Für den Grundriss ist von einer breiten Stromlinienform ausgegangen worden. Bereits die ersten Versuche zeigten eine unangenehm enge Lage der Randwirbel und damit hohen induzierten Widerstand. Deshalb wurde der Grundriss um eine Art "horizontale Winglets" erweitert. Dieser Punkt hat einige interessante Konsequenzen nicht nur für die Flugleistungen, sondern auch für die Flugeigenschaften gebracht.

Es wurde weiterhin angestrebt, Interferenzwiderstände möglichst gering zu halten. Das sind Widerstände die dadurch entstehen, dass Einzelkomponenten wie Flügel und Rumpf sich gegenseitig ungünstig beeinflussen. Dazu wurde beim SmartFish die Länge des Rumpfes immer gleich gehalten wie die Tiefe des Flügels. Ebenfalls wurde darauf Wert gelegt, das oder die Triebwerke in den Rumpf zu integrieren, den damit verbundenen Aufwand zu leisten und nicht als Gondel irgendwo daranzuhängen, was unvermeidlich Interferenzwiderstände erzeugen würde. Bei allen

aerodynamischen Untersuchungen war immer die Gesamtkonfiguration Gegenstand der Abklärungen, nie einzelne Komponenten.

Die resultierende Konfiguration liegt vom Aussehen her zwischen einem Lifting-Body und einem konventionellen Flugzeug (siehe Bild 2). Damit ist die Schwierigkeit verbunden, dass weder die einfache Theorie der schlanken Körper, noch die Theorie der gestreckten Flügel gültig sind. Anderseits müssen zwingend Überlegungen aus beiden Gebieten angewandt werden und für Berechnungen sind nur voll dreidimensionale, numerische Verfahren anwendbar.

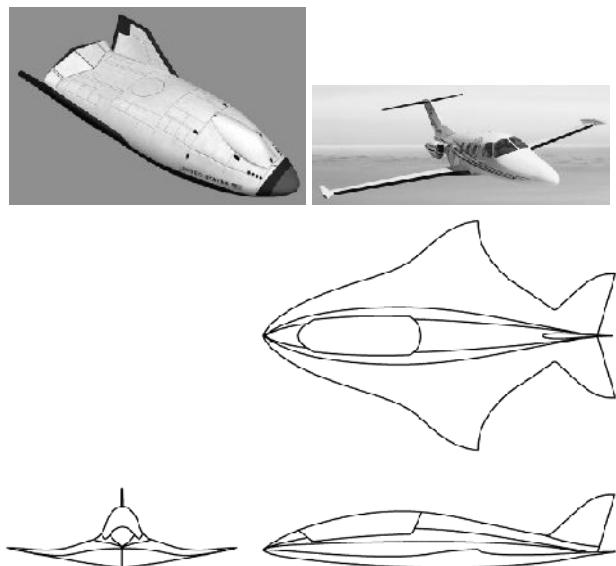


Bild 2 SmartFish Konfiguration zwischen Lifting-Body und konventionellem Flugzeug

Eine schwanzlose Konfiguration wurde bewusst nicht gewählt, da damit häufig ein hoher Trimmwiderstand und unangenehme Flugeigenschaften verbunden sind. Im Gegensatz zu den sogenannten Nurflügelflugzeugen gelang es den Teil, der als Flügel angesprochen werden kann, mit völlig fixer Geometrie auszubilden. Sämtliche Steuerflächen befinden sich am Leitwerk.

Die grosse Flügeltiefe in der Symmetrieebene ermöglicht eine grosse Bauhöhe der Flügelwurzel.

Das ursprüngliche Ziel war eine neue integrierte Konfiguration für Kleinflugzeuge optimiert für den Reiseflugzustand bei hoher Unterschallgeschwindigkeit und grosse Reichweiten.

Die Konfiguration verspricht wesentliche Vereinfachungen der Zelle, enormes nutzbares internes Volumen und einen hohen Anteil Zuladung.

2 Beschreibung

Das Flugzeug präsentiert sich als ein stromlinienförmiges Gebilde, bei dem nicht genau definiert werden kann, wo der Flügel aufhört und der

Rumpf beginnt. Es wurde vor allem im Hinblick auf einen zweisitzigen Demonstrator mit Turbofan-Antrieb konzipiert. Die Gestaltung der Kabine ergibt sich aus der Bedingung, dass der Pilot im Landeanflug beim entsprechenden Anstellwinkel Sicht nach vorne haben muss (siehe Bild 3). In der Kabine sind zwei Sitze hintereinander vorgesehen.

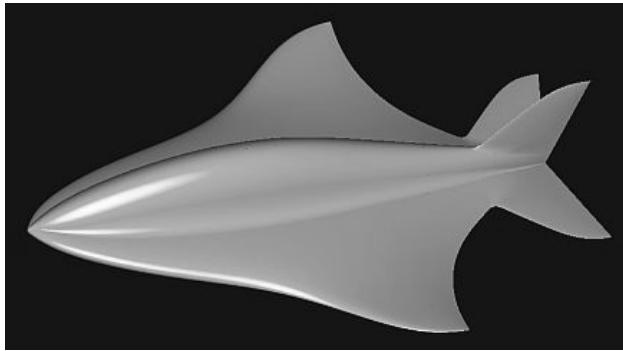


Bild 3 Ansicht des Flugzeugs ohne Triebwerk im CAD-System

Die nötige Flügelspannweite wird durch die Forderung nach genügend Steigleistung unmittelbar nach dem Abheben beim Start diktiert. An der Flügelfläche befinden sich keine Klappen. Die Steuerflächen befinden sich alle am Leitwerk. Zur Längsteuerung werden die Höhenruder gleichsinnig ausgeschlagen, für die Rollsteuerung werden sie gegensinnig ausgeschlagen. Im Seitenleitwerk ist eine Klappe zur Giersteuerung angebracht, welche für den Landeanflug gespreizt werden kann, ähnlich wie beim Spaceshuttle. Die Position des Leitwerks ist aus Gründen der Bodenfreiheit des Hecks bei Start und Landung begrenzt. Das Turbofan-Triebwerk ist hinter der Kabine im Rumpf eingebaut. Für den oder die Einläufe sind mehrere Positionierungsmöglichkeiten machbar.

2.1 Abgrenzung

Die Besonderheiten der Konfiguration sind die Kombination von

- einem kleinen Seitenverhältnis ($= 1,7$)
- einer kleinen Flächenbelastung
- speziellem Grundriss
- integrierte, "fliessende" Form
- separatem Leitwerk hinten
- fixer Konfiguration.

2.2 Erstmaligkeit

Vielfach wird bezweifelt, dass es heute noch möglich ist, eine neue Flugzeugkonfiguration zu schaffen. Im Fall des SmartFish ist kein Flugzeug oder Flugzeugprojekt bekannt, welches die beschriebenen Elemente in gleicher Weise kombiniert, obwohl sicher schon öfters Überlegungen in derselben Richtung angestellt worden sind.

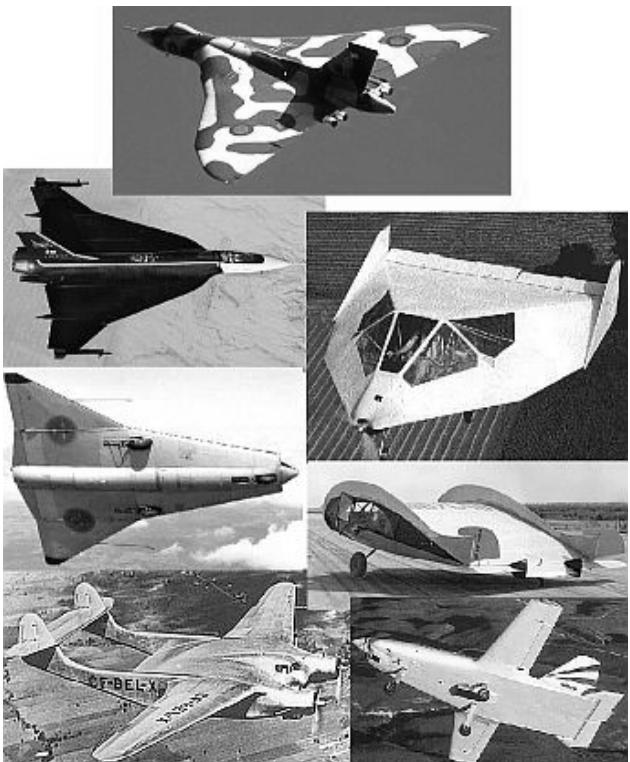


Bild 4 Bilder von Flugzeugen mit ähnlichem Hintergrund

3 Eingesetzte Mittel

Wie bei jeder Entwicklung einer neuen Flugzeugkonfiguration, wurden zu Beginn freifliegende, ungesteuerte Modelle ohne Antrieb eingesetzt.

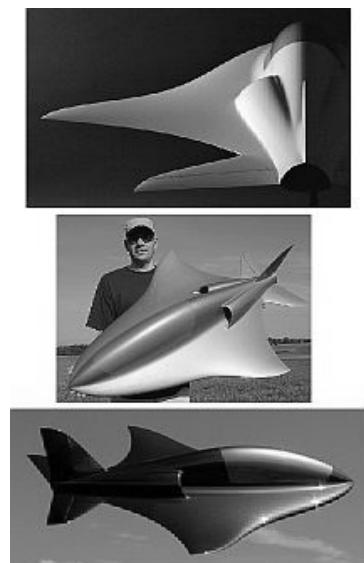


Bild 5 ferngesteuerte Modelle

Schon bald wurde dieses Stadium verlassen und ein grosser Teil der Abklärungen erfolgte mit Hilfe von diversen ferngesteuerten Modellen in Faserverbundbauweise angetrieben von batteriegespiesenen

Elektroimpellern. Die ferngesteuerten Modelle im Maßstab 1:6 und 1:4 sind alle zur Zufriedenheit geflogen, dienten der Verfeinerung der Auslegung und brachten viele Erkenntnisse über die Flugmechanik der Konfiguration.

Die Definition und Konstruktion der ferngesteuerten Modelle erfolgte computergestützt (CAD), was die Grundlage für viele nachfolgende Aktivitäten bildet, denn damit lassen sich fast beliebige Flächen definieren, welche von Hand kaum gezeichnet werden können. Anderseits zeigte es sich immer wieder, dass das die Möglichkeiten des CAD auch die Limite bilden bei der Gestaltung.

Dank dem CAD können mittels numerisch gesteuertem Fräsen (CAM) die so definierten Formen automatisch gefräst werden.

Die Realisierung der Modelle und später auch des Prototypen erfolgt dann in Faserverbund-Sandwich-Technik, welche bezüglich Formgebungsmöglichkeiten kaum Wünsche offen lässt. Dieser Umstand wurde für die Formgebung konsequent ausgenutzt.

Die CAD-Daten werden ebenfalls für die numerischen Strömungsberechnungen (CFD) als Eingangswerte benutzt. Die CFD-Resultate stellen ein sehr mächtiges Werkzeug für die Konfigurationsentwicklung dar. Obwohl die Produktivität des Verfahrens geringer ist, als bei Windkanalmessungen, ist die Möglichkeit der Darstellung der Strömungsfelder ohne Störung durch Sonden und Traversiereinrichtungen von unschätzbarem Wert. CFD war die einzige Möglichkeit, zu Resultaten bei transsonischen Machzahlen zu kommen.



Bild 6 Modell an Aufhängung mit Stielattrappe zur Aufhängungsinterferenzbestimmung.

Ergänzt wurden die CFD-Abklärungen mit Messungen im Unterschallwindkanal der RUAG in Emmen,

Schweiz. Mit einem 1:6 Modell wurden mit einer internen Waage Kraftmessungen durchgeführt. Die Modellaufhängung erlaubte Anstellwinkel von -5° bis $+35^\circ$, sowie Schiebewinkel. Ruderwirkungen wurden ebenfalls untersucht. Dank des grossen Kanalquerschnitts konnten Wandeinflüsse vernachlässigt werden. Die Messungen ergaben unerwartet ebenfalls einen vernachlässigbaren Aufhängungseinfluss. Der grösste Teil der Messungen erfolgte mit künstlich fixiertem Umschlag. Eine gewisse Schwierigkeit bot die Tatsache, dass die vorhandene Waage dank des sehr geringen Widerstandes nur schwach ausgelastet worden ist.



Bild 7 Strömungssichtbarmachung: Flügelende Oberseite, $\text{Alpha}=17^\circ$

Der Windkanal ermöglichte experimentelle Sichtbarmachungen der Oberflächenströmung mit der TiO₂-Öl Anstrichmethode. Dasselbe ist eigentlich auch mit CFD möglich. Die Vergleiche zeigten, dass die grossen Phänomene gut übereinstimmen, dass der reale Versuch im Windkanal aber sehr viel mehr Details der Wirbelbildungen und kleinen Ablösungen aufzeigt, als das Computerprogramm in der Lage ist (siehe Bild 7).

Durch die leichte Verfügbarkeit von leistungsfähiger Computer Hard- und Software und neuer Materialien sind die Möglichkeiten des Flugzeugentwurfs in den letzten Jahren gewaltig erweitert worden, was sich auch in neuartigen Gestaltungen äussern sollte.

4 Detailoptimierungen

Flügel mit sehr kleinen Seitenverhältnissen tendieren fast unabhängig vom Grundriss zu elliptischer Auftriebsverteilung. Da das Seitenverhältnis des SmartFish zwar klein, aber nicht extrem klein ist, und der Grundriss stark von einer Ellipse abweicht, mussten die Flügelenden geschränkt werden, um im Steig- und Reiseflug näher an die elliptische Auftriebsverteilung zu kommen.

Erste Windkanaluntersuchungen bei der HTL Genf mit Fadensonden zeigten, dass an der Oberseite des Flügelendes eine grobe Ablösung entsteht, sobald der Vorderkantenwirbel aufzuplatzen beginnt. Dies konnte vermieden werden, wenn das Flügelprofil im Aussenteil positiv gewölbt wurde. Diese Wölbung musste sorgfältig dosiert werden, damit im Reiseflug nicht auf der Unterseite ein Vorderkantenwirbel entsteht, was hohen Widerstand verursachen würde.

Nicht ganz zufriedenstellende Stabilitäts- und Trimmeigenschaften gewisser Modelle bei geringen Anstellwinkeln erforderten eine Verbesserung der statischen Längsstabilität. Dies wurde erreicht durch die Anwendung von negativer Wölbung im Innenbereich des Flügels. Die Wirkung kann so angesprochen werden, dass damit der vordere Teil als angestellter schlanker Flügel Auftrieb und damit ein aufrichtendes Moment liefert. Negative Wölbung im Innenteil und nominelle Schwerpunktslage sind so abzustimmen, dass das Höhenruder im Reiseflug nicht ausgeschlagen werden muss.

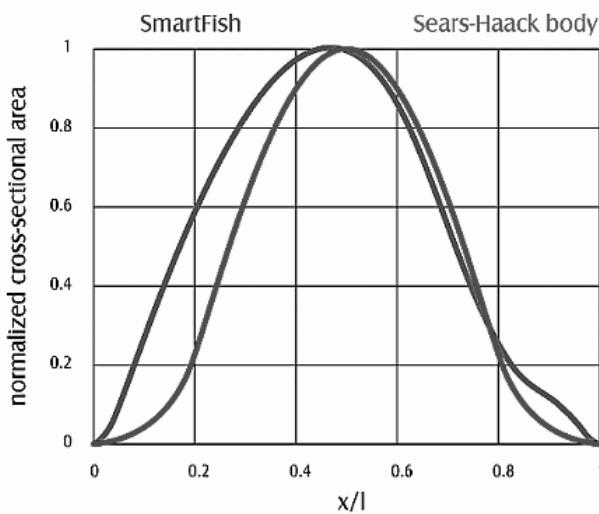


Bild 8 Querschnittsverlauf über die Länge

Wenig Optimierung war nötig bezüglich Querschnittsverlauf, bzw. Flächenregel. Die SmartFish-Konfiguration erfüllt die Flächenregel von Natur aus recht gut. Das zahlte sich aus, indem nach sorgfältiger Einstellung der Schränkung der Neutralpunkt bis $Ma = 0,9$ praktisch unabhängig von der Machzahl konstant blieb.

5 Eigenschaften

5.1 Reibungswiderstand

Bei einer solchen Konfiguration mit fliessenden Linien taucht bald die Frage auf, ob eine laminare Grenzschichtströmung erwartet werden könnte. Leider konnte diese Frage bis heute nicht schlüssig beantwortet werden.

Einerseits zeigen die Isobaren über grosse Teile der Flächen nur wenig Pfeilung, so dass kaum Querströmung in der Grenzschicht entsteht, was einer Laminarströmung förderlich wäre. Andererseits entsteht durch die starke Pfeilung der gut gerundeten Eintrittskante in einer dünnen Stromröhre entlang der Staulinie eine kräftige Querströmung, welche angetan ist, jede Turbulenz über die Spannweite nach aussen zu verbreiten und damit die Grenzschicht mit Turbulenz zu infizieren. Diese Strömung ist sowohl in den Resultaten der Strömungsberechnungen, sowie in den Sichtbarmachungen klar zutage getreten. Andererseits wird diese Strömung im vordern Teil der Eintrittskante durch die kontinuierlich zunehmende Pfeilung ständig beschleunigt, was wiederum die Turbulenzentwicklung hemmt.

Die Praxis mit den ferngesteuerten Modellen und auch die Windkanalmessungen zeigten wesentliche Einflüsse eines künstlichen Umschlags, was gewisse Bereiche mit laminarer Grenzschicht vermuten lässt. Andererseits gelang es in Windkanaluntersuchungen der ETHZ [4] nicht, laminare Grenzschichtbereiche direkt und schlüssig nachzuweisen, obwohl gewisse Hinweise auf diesen Zustand beobachtet wurden.

Wie sich die Erhöhung der Reynoldszahl bei einer Grossausführung auswirkt, ist unklar. Noch unsicherer ist, ob es gelingt, bei einer bemannten Ausführung die Oberfläche genügend glatt zu halten, da mannigfache Bedürfnisse für Wartungsöffnungen, Sonden, Antennen, Fahrwerkdeckel usw. der Laminarhaltung der Grenzschicht nicht förderlich sind.

Deshalb wurde für die Leistungsabschätzung konservativ eine vollturbulente Umströmung angenommen.

5.2 Gleitzahl

Die bisherigen Abschätzungen lassen Gleitzahlen zwischen 12 und 14 erwarten. Im unterkritischen Unterschallbereich deutet vieles darauf hin, dass mit zunehmener Machzahl mit einer Verbesserung der Gleitzahl gerechnet werden darf.

Die kritische Machzahl liegt zwischen 0,85 und 0,90. Oberhalb derselben verschlechtert sich die Gleitzahl.

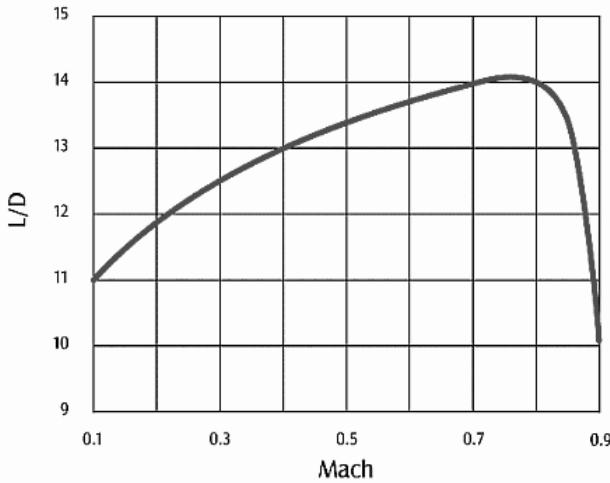


Bild 9 Gleitzahlverlauf in Funktion der Machzahl.
CFD-Berechnung einer frühen Variante,
ETHL Lausanne

lässt sich mit kleinen Eingriffen wie Zäunen, Strakes und Schlitzen in der Vorderkante nicht korrigieren, allenfalls etwas verschieben.

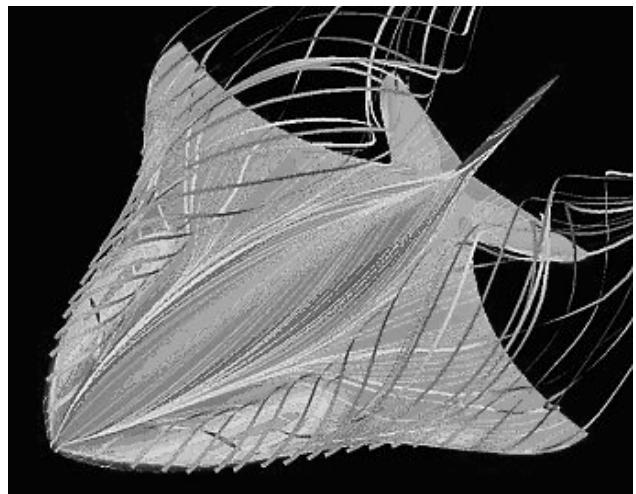


Bild 10 CFD-Darstellung des Zustandes mit
ausgebildeten Wirbeln. Das Bild zeigt freie
Stromlinien, Wandstromlinien, Isobaren

5.3 Langsamflugeigenschaften

Ein direkter Eindruck zu den Langsamfliegenschaften konnte mit der Erprobung der ferngesteuerten Modelle gewonnen werden. Typisch für Flugzeuge mit Deltaflügel ist ein abruptes seitliches Ausbrechen (lateral departure) beim Überziehen, welches zu einer Flachvrire führen kann. Im Fall des SmartFish geschieht nichts dergleichen. Ein seitliches Ausbrechen findet nicht statt. Das Flugzeug geht kontinuierlich in einen stabilen Sackflug über, der beibehalten oder jederzeit mit neutralisieren des Höhensteuers beendet werden kann. Der Übergang ist so kontinuierlich, dass sich eine bestimmte Minimalgeschwindigkeit nicht direkt definieren lässt.

5.3.1 Erklärung

Bei Erhöhung des Anstellwinkels geht die Strömung an der Oberseite eines Deltaflügels vom anliegenden Zustand in einen mit je einem abgelösten, aber stabilen Wirbel entlang der Oberseite der Vorderkante über. Bei weiterer Erhöhung des Anstellwinkels brechen diese Wirbel von hinten nach vorne zusammen, indem sich in den Wirbelkernen eine grobturbulente Rückströmung ausbildet.

Schon bei ganz geringen Schiebewinkeln passiert dieser Vorgang bevorzugt am voreilenden Teil eines Deltaflügels, was eine krasse Asymmetrie auslöst und gleichzeitig das Seitenleitwerk unwirksam macht. Dabei gehen gleichzeitig Roll- und Gierstabilität verloren, was zum seitlichen Ausbrechen führt. Die Erfahrung mit Kampfflugzeugen zeigt, dass dabei auch eine unsymmetrische Wirbelbildung an der meist rotationssymmetrischen Rumpfnase eine Rolle spielen kann. Dieses Verhalten einer Deltaflügelkonfiguration

Beim SmartFish haben wir ebenfalls die Wirbelbildung entlang der Vorderkante ab etwa 15° Anstellwinkel (siehe Bild 10). Bei weiterer Erhöhung des Anstellwinkels brechen die Wirbel im Bereich vor dem Flügelende zusammen, dort wo die Pfeilung wieder geringer wird. Damit ist durch den Grundriss eine Symmetrie des Vorgangs gegeben, welche auch durch mäßiges Schieben nicht gestört wird. Da ein über den Flügel hinausragender Vorderrumpf gar nicht existiert, können sich dort auch keine asymmetrischen Wirbel ausbilden.

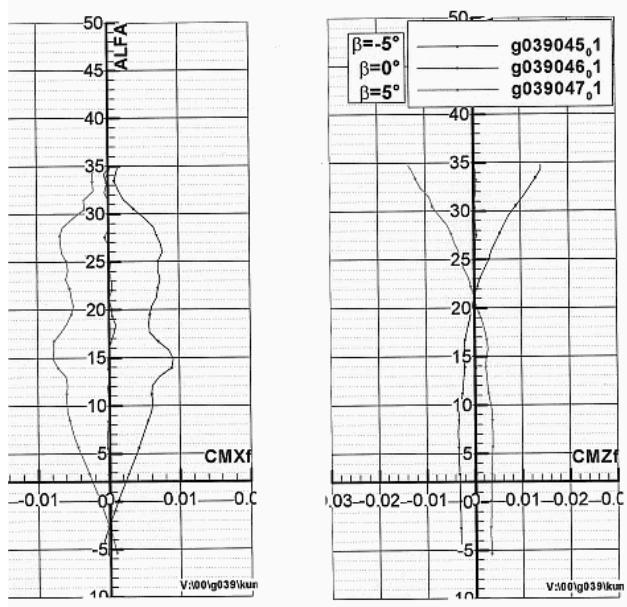


Bild 11 Kraftmessungen, Roll- und Seitenstabilität

Die Windkanalmessungen haben ergeben, dass die Rollstabilität im ganzen gemessenen Bereich bis zu 35°

bestehen bleibt, was ein Ausbrechen zuverlässig verhindert (siehe Bild 11). Dabei wurden keine zusätzlichen Massnahmen wie Zäune und Abreisskanten eingesetzt.

Auch von Flugzeugen mit Doppeldelta-Grundriss, wie z.B. SAAB Draken, ist bekanntgeworden, dass dort das seitliche Ausbrechen vermieden werden kann.

5.3.2 Bedeutung

Der Flugbereich mit guten Leistungen liegt im Bereich der anliegenden Strömung. Die Vorderkantenwirbel erzeugen zwar eine Zunahme des Auftriebs, aber auch des Widerstands, so dass sich die Gleitzahl im Bereich des ausgebildeten Wirbels verschlechtert. Dieser Zustand dürfte im Normaleinsatz höchstens unmittelbar vor dem Aufsetzen bei der Landung eintreten.

Die guten Langsamflugeigenschaften sind jedoch eine starke Erleichterung für die Zertifizierung eines auf der SmartFish-Konfiguration basierenden Flugzeugs und stellen ein wesentliches Sicherheitspotential dar etwa bei einem Durchstart unter erschwerten Bedingungen.

5.4 Strukturaspekte

Die Konfiguration des SmartFishes ist bezüglich Strukturaspekten sehr günstig, denn dank der Minimierung der Spannweite entstehen nur geringe Biegemomente. Die Unterbringung des Brennstoffs ausschliesslich in den Flügeln trägt bei zu einer weiten Reduktion. Die Biegemomente verteilen sich über eine grosse Tiefe. Zudem ist die absolute Dicke des Flügels verhältnismässig gross. Es ist zu erwarten, dass die Flügelstruktur sehr leicht dimensioniert werden kann.

Im Rumpf ist die Masse über die ganze Flügeltiefe verteilt, so dass auch hier kaum Biegemomente entstehen.

Zwischen Flügel und Rumpf entstehen kaum Punktlasten, weil die Schnittstellen über die ganze Länge verteilt sind.

Aeroelastische Probleme und Flattererscheinungen können für den Flügel praktisch ausgeschlossen werden, somit ist auch die Steifigkeit unkritisch.

Diese Punkte, sowie die Abwesenheit jeglicher Flügelklappen ermöglichen eine verhältnismässig einfache Gestaltung der Struktur, was zu einer preisgünstigen Herstellung führt.

Das Leitwerk weist eine konventionelle Konfiguration, bestehend aus fixen Flossen mit angehängten, masseausgeglichenen Rudern dar. Es bringt nichts Neues und muss deshalb bezüglich Statik und Flattern genauso ausgelegt und überprüft werden, wie bei

jedem andern Flugzeug auch.

Obwohl ein extrem kleines Strukturgewicht zu erwarten ist, wurde für die Leistungsabschätzung konservativ eine Strukturdichte pro Fläche wie bei einem Segelflugzeug angenommen.

5.5 Internes Volumen

Die SmartFish-Konfiguration ermöglicht ein im Vergleich zu konventionellen Konfigurationen enormes nutzbares internes Volumen. Die Brennstoftanks können beiderseits des Rumpfes in den Innenflügeln bequem in Schwerpunktnähe untergebracht werden. Für Avionik, Sauerstoffanlage und andere Ausrüstung steht im Vorderteil der Flügel sehr viel Platz zur Verfügung. Da laut CFD-Resultaten der Rumpf die Oberseitenströmung kaum stört, kann auch die Unterseite "ausgebaucht" werden, wenn noch mehr Platz gewünscht wird.

6 Vergleiche

Das Seitenverhältnis des SmartFish beträgt nur einen Bruchteil desjenigen eines Jettrainers. Deshalb ist der Beiwert des induzierten Widerstandes sehr viel höher. Beim Beiwert geht jedoch die Grösse der oft willkürlich definierten Bezugsfläche in die Rechnung ein, so dass sich dieses Kriterium für unterschiedliche Konfigurationen als ungeeignet erweist.

$$C_{Di} = \frac{k C_L^2}{\pi \Lambda} \quad \Lambda = \frac{b^2}{F}$$

Bei der Berechnung des induzierten Widerstandes als Kraft hingegen fällt die Flügelfläche aus der Rechnung und nur die Spannweitenbelastung ist massgebend. Die Spannweitenbelastung jedoch ist sehr ähnlich wie bei einem Jettrainer, so dass dem SmartFish aufgrund des induzierten Widerstandes kein Nachteil erwächst. Dieser Vergleich steht im Gegensatz zur traditionellen Empfindung, beruht jedoch auf echten Zahlenwerten.

$$W_i = \frac{k}{\pi q} \left(\frac{A}{b} \right)^2$$

Nun scheint der SmartFish doch offensichtlich zuviel Flügelfläche aufzuweisen. Die grosse Flügelfläche ermöglicht einmal den Verzicht auf Landeklappen. Anderseits hinkt der direkte Vergleich der Flächen. Das Seitenverhältnis berechnet sich traditionellerweise als Spannweite im Quadrat dividiert durch die projizierte Flügelfläche. Das ist für Einzelflügel berechtigt. Ein ganzes Flugzeug hat aber noch viel mehr benetzte Oberflächen, welche Reibungswiderstand verursachen. Wenn wir als neues Kriterium die Spannweite im Quadrat dividiert durch die gesamte benetzte Oberfläche bilden, unterscheidet sich der

SmartFish kaum mehr von einem konventionellen Flugzeug. In diesem Vergleich würde ein Nurflügel am besten abschneiden, damit müssen jedoch diverse andere Nachteile in Kauf genommen werden.

7 Daten und Leistungen

Die Auslegung eines zweisitzigen Demonstrators mit dem verfügbaren Turbofan-Triebwerk FJ33 ergab nachstehende Eckdaten und grob geschätzte Leistungen, wobei die Reisehöhe bei Einbau einer Druckkabine grösser gewählt werden könnte, was beim ersten Demonstrator noch nicht vorgesehen ist:

SmartFish-Demonstrator Spezifikationen

Spannweite	5,4	m
Länge	6,9	m
Insassen	2	
Leermasse	500	kg
Brennstoff	500	kg
maximale Abflugmasse	1200	kg
Reisehöhe	6000	m/M
max Reisegeschwindigkeit	0,85	Mach
max Reichweite	3000	km
Startrollstrecke bei maximaler Masse	700	m

8 Einschränkungen

Es wäre verfehlt, nun SmartFish als das alleinige Konzept für Flugzeuge der Zukunft zu bezeichnen. Es ist zwar geeignet, um schnell und weit zu fliegen, hingegen nicht um bei geringer Geschwindigkeit lange in der Luft zu bleiben.

Die SmartFish-Konfiguration dürfte geeignet sein für Flugzeuge, welche 2 bis 20 Personen transportieren. Bei weiterer Vergrösserung sind Schwierigkeiten mit der Schwerpunktslage und der benötigten Fahrwerkshöhe absehbar.

9 Ausblicke

9.1 Demonstrator

Als nächster grosser Schritt ist die Detailplanung und der Bau eines zweisitzigen Demonstrators vorgesehen. Dazu hat sich ein industrielles Team aus vorwiegend

deutschen Betrieben gebildet.

Nach eingehender technischer Flugerprobung lässt sich der Versuchsträger als schnelles Kleinreiseflugzeug einsetzen. Dank der guten Eigenschaften bei hohen Anstellwinkeln ist auch die Möglichkeit von einfacher Akrobistik gegeben.

9.2 Drohnen

Das SmartFish-Konzept könnte sich für unbemannte Aufklärungsdrohnen eignen, wenn schnell weit entfernte Ziele angeflogen werden müssen.

Eine Universitätsgruppe hat als Erprobungsträger für einen Brennstoffzellenantrieb eine SmartFish-Drohne, abgeleitet aus den bereits existierenden ferngesteuerten Modellen, vorgesehen.

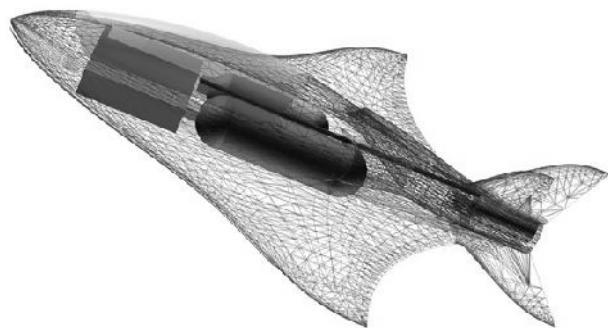


Bild 12 Projektzeichnung HyFish

9.3 Reiseflugzeug

Das Konzept lässt sich ausbauen für Reiseflugzeuge der Grösse des Piaggio-Avanti. Dank des hohen Zuladungsanteils kann bei Verzicht auf extrem gesteigerte Reichweiten eine grosse Nutzlast befördert werden, womit sich die Kosten pro Sitzkilometer senken lassen.

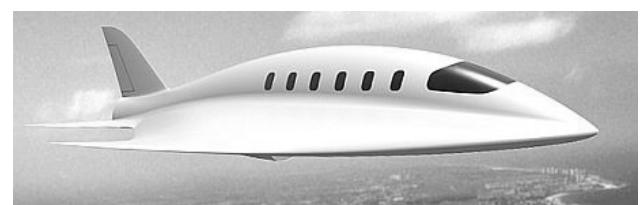


Bild 13 Impression eines SmartFish-Businessjets

9.4 Extreme Flugdistanzen

Wird bei einer Vergrösserung des Flugzeuges anstelle der Nutzlast vor allem die Brennstoffzuladung erhöht und die Treibwerksgrösse angepasst, so lassen sich enorme Reichweiten erzielen. Das ist eine Konsequenz aus der Breguet'schen Reichweitenformel:

$$R = \frac{v}{g} \frac{L}{D} \frac{1}{SFC} \ln \left(\frac{m_t}{m_t - m_{br}} \right)$$

Beim SmartFish-Konzept können durch die hohe Reisegeschwindigkeit v und das ausgezeichnete Verhältnis von Brennstoffmasse m_{br} zur Gesamtmasse m_t bei gleichzeitig guter Gleitzahl globale Reichweiten erzielt werden.

9.5 Überschall

Der SmartFish besitzt wie jedes reale Objekt eine kritische Machzahl, oberhalb welcher sich meistens Stosswellen in der Strömung ausbilden. Die CFD-Resultate zeigen, dass diese Stosswellen an der Austrittskante der Flügelenden beginnen und keine Ablösungen verursachen.

Bei geeigneter Wahl der Triebwerke, entsprechender Anpassung der Triebwerkseinläufe und der Steuerflächen wäre eine Erweiterung der Flug-enveloppe in den niedrigen Überschallbereich denkbar.

9.6 Suborbitalflug

Das Konzept SmartFish kennt keine natürliche Machzahlgrenze. Es könnte deshalb geeignet sein für Suborbitalflüge, wie sie derzeit im Rahmen des X-Price-Projektes geplant und auch schon ausgeführt worden sind.

10 Literatur

- [1] C. Ulrich, H. Pflugshaupt
SmartFish, Transonic Multipurpose Aircraft Concept.
SmartFish-Team, Bern 2003
- [2] H. Hertel
Struktur, Form, Bewegung.
Krauskopf-Verlag, Mainz 1963
- [3] S. Hoerner, H. Borst
Fluid-Dynamic Drag.
Hoerner Fluid Dynamics 1985
- [4] D. Ischi
Diplomarbeit ETHZ, Zürich 2004