

# ENTWURF EINES VERSTELLPROPELLERS FÜR DIE STRATOSPÄRENPLATTFORM LUFTWURM 2.0

A. Hirner

Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik  
Pfaffenwaldring 21, D-70550 Stuttgart

## ÜBERSICHT

Der vorliegende Beitrag beinhaltet die aerodynamische Auslegung eines Propellers für die Stratosphärenplattform *Luftwurm 2.0*. Mit den Propellerauslegungsprogrammen PROPPY und XROTOR wurden hierzu zunächst Parameterstudien zur Ermittlung des Leistungsverhaltens in der projektierten Flughöhe von 15 km bei Variation der frei wählbaren Propellerauslegungsparameter durchgeführt. Anhand des so erhaltenen Vorentwurfs wurden die Anforderungen an die Profilierung des Propellerblattes für verschiedene Flughöhen und -geschwindigkeiten abgeschätzt. Aufgrund der großen Flughöhe und der niedrigen Flugeschwindigkeit sind die Reynoldszahlen am Propellerblatt sehr niedrig, weshalb bei der Profilwahl die Minimierung der Verluste in der transitionellen Ablöseblase im Vordergrund steht. Basierend auf den in den Vorentwürfen erhaltenen Anforderungen entstand unter Verwendung des Eppler'schen Profilcodes ein speziell angepaßter Profilstrak, der mit dem ebenfalls für kleine Reynoldszahlen gut geeigneten Programm XFOIL gegengerechnet wurde.

## 1 EINLEITUNG

In Zeiten ständig zunehmenden mobilen Datenverkehrs mit immer schnelleren Datenübertragungsraten und höheren erforderlichen Bandbreiten steigt die Notwendigkeit, neben den bereits bestehenden bodengebundenen und satellitenbasierten Telekommunikationssystemen nach Alternativen zu suchen. Diese müssen dem Datenaufkommen der Zukunft gewachsen sein und eine flächendeckende Nutzung gewährleisten. Dies erfolgt auch unter dem Hintergrund eines steigenden Protestes der Bevölkerung gegen die weitere Stationierung von Sendeanlagen in Wohngebieten aufgrund unterschiedlicher Studienergebnisse über die Auswirkung von Elektromog auf den menschlichen Organismus.

Eine Alternative zu den bisher verfolgten Konzepten bieten sogenannte Höhenplattformen, auch als "atmosphärische Satelliten" bezeichnet. Dies sind mit Telekommunikationseinrichtungen bestückte unbemannte Flugobjekte, die in der Stratosphäre in einer Flughöhe

von ungefähr 20 km aufgrund der dort günstigen Windverhältnisse ihre Position über der Erdoberfläche in gewissen Toleranzen beibehalten sollen. Diese gewährleisten eine strahlungsärmere und großflächigere Funkausleuchtung von oben und lassen sich zur Aufrüstung von Systemkomponenten und Treibstoff für die Antriebseinheiten in regelmäßigen Abständen zu einer Basisstation am Boden zurückholen. Mit weiterentwickelten Technologien in der Solar- und Wasserstofftechnik sollen diese Stationen zukünftig mit einem regenerativen Antriebssystem bestehend aus Solar- und Brennstoffzellen über längere Zeiträume betrieben werden. Stratosphärische Höhenplattformen bieten sich insbesondere für die Versorgung von Ballungsräumen an, wo aufgrund der Störung des Sendesignals bedingt durch die Bebauung für eine lückenlose Versorgung sehr viele und somit auch mit hohen Kosten verbundene Sendeanlagen notwendig sind.

Zur Realisierung von Stratosphärenplattformen konkurrieren neben Flugzeugen nach dem Prinzip "Schwerer als Luft" auch Luftschiffe nach dem Prinzip "Leichter als Luft". Am Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart entschied man sich aufgrund der Überlegenheit des Luftschiffs bei niedrigen Windgeschwindigkeiten für eine Luftschiffkonfiguration. Diese ist bei Windgeschwindigkeiten unter 100 km/h gegenüber einem Flugzeug mit einer Mindestfluggeschwindigkeit sehr energieeffizient und zur Beibehaltung der Position über dem Erdboden nicht zu ständigem Kreisflug gezwungen.

Im Gegensatz zu konventionellen Luftschiffen handelt es sich bei dem an der Universität Stuttgart verfolgten Konzept jedoch um einen völlig neuen technologischen Ansatz. Bei diesem ist das Luftschiff in 5 einzelne, miteinander verbundene Segmente unterteilt, woraus sich auch die Bezeichnung *Luftwurm* ableitet. Aufgrund der geringen Luftdichte in 20 km Höhe, die dort nur noch 7% ihres Wertes am Boden beträgt, kommt der Minimierung der strukturellen Massen bei Stratosphärenplattformen eine essentielle Bedeutung zu. Diese sind bei einem unstarren Luftschiff mit einem Längen-Durchmesser-Verhältnis von Eins (Kugel) am geringsten. Deshalb ist der *Luftwurm* aus mehreren quasi-kugelförmigen Segmenten bei gleichzeitig ae-

rodynamischer Formgebung der Gesamtkonfiguration zur Erzielung eines für die Missionsdauer entscheidenden geringen Luftschiffwiderstandes aufgebaut. Zur Erprobung des Konzepts wurden bisher mehrere 23 m lange Prototypen des *Luftwurm* gebaut und erfolgreich getestet (BILD 1).



BILD 1: *Luftwurm* AW 1.3cL59

Angetrieben wird der Luftwurm durch seitlich angebrachte Propeller, die neben dem Antrieb auch die Stabilisierung der beweglich miteinander verbundenen Luftschiffsegmente durch differentiellen Schub übernehmen (BILD 2). Der Propellerantrieb in Kombination mit Elektromotoren bietet sich aufgrund des favorisierten Konzepts eines regenerativen Antriebs mit Solar- und Brennstoffzellen und der guten Regelbarkeit, wie sie für die Segmentstabilisierung benötigt wird, an. Aufgrund der geringen vorherrschenden Windgeschwindigkeiten in der Stratosphäre und den deshalb geringen notwendigen Fluggeschwindigkeiten besitzt der Propeller für diesen Einsatzzweck den besten Antriebswirkungsgrad.

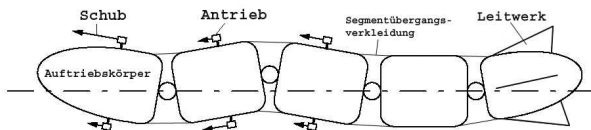


BILD 2: Das Luftwurmprinzip

Nachdem bereits einige Erprobungsträger in kleinem Maßstab gebaut und in Bodennähe geflogen wurden, sollen nun mit der momentan im Bau befindlichen größeren Version AW 2.0 das Konzept auf größerer Skala und das Systemverhalten in Höhen von 15 - 20 km überprüft werden.

Bei einem Aufstieg vom Boden in die geplante Operationshöhe von 20 km ändern sich die atmosphärischen Größen wie Luftdichte, Luftdruck, Temperatur und die kinematische Zähigkeit der Luft sehr stark. Zur Untersuchung des Flugverhaltens des *Luftwurm* unter diesen Bedingungen wird ein 60 m langer Versuchsträger vorbereitet, der in Höhen von 15 bis 20 km Höhe operieren soll. Dieser wird mit insgesamt 6 Verstellpropellern ausgestattet, die an den ersten drei Segmenten seitlich an Auslegern angebracht sind. Die Propeller wurden mit geringstmöglichem Gewicht in Faserverbundbauweise erstellt und

so ausgelegt, daß sie in Kombination mit den Elektromotoren in der Operationshöhe über einen weiten Geschwindigkeitsbereich sehr energieeffizient arbeiten und auch beim Auf- und Abstieg des *Luftwurm* ausreichend Schub erzeugen, um manövrierfähig zu sein. Stratosphärenpropeller operieren typischerweise unter sehr kleinen Reynoldszahlen und hohen subsonischen Machzahlen, bei denen die Profilumströmung zum Teil von widerstandserhöhenden Ablöseblasen gekennzeichnet ist. Da der Einfluß der in der Stratosphäre vorliegenden atmosphärischen Anströmerturbulenzen auf den laminar-turbulenten Strömungsumschlag der Profilumströmung und damit letztendlich das Betriebsverhalten des Propellers bis heute ungeklärt ist, sind neben Versuchen des *Luftwurm* auch einzelne Propellertests mit Höhenballonen geplant. Diese dienen dem weiteren Verständnis der Flugphysik der mehrsegmentigen Höhenplattform als auch der Auslegung und Verbesserung der Systemkomponenten für eine zu Telekommunikationszwecken einsatzfähigen Großversion der Höhenplattform.

## 2 Propellerauslegung

Im folgenden soll auf die für Propeller spezifischen Strömungsphänomene und die hierfür im Laufe der Zeit entwickelten Theorien und Verfahren zum Entwurf von Propellern eingegangen sowie deren Gültigkeits- und Einsatzbereiche herausgestellt werden.

### 2.1 Strömungsphänomene

Wie beim Tragflügel gehen auch von einem rotierenden Propeller Wirbelschichten ab. Diese sind jedoch gekrümmt und liegen auf spiralförmig verdrehten Flächen. Die Wirbelschichten rollen sich zum Rand hin auf und bilden dort Randwirbel, die von ihrer Anzahl der Blattanzahl des Propellers entsprechen. Der sich gleichzeitig ausbildende zentrale Nabenwirbel entspricht von seiner Stärke der Summe der Randwirbel und weist entgegengesetzten Drehsinn auf (BILD 3).

Das von den Wirbeln erzeugte Geschwindigkeitsfeld bewirkt eine Verringerung der Schubkraft des Propellers. Die Anteile der Energieverluste eines Propellers betragen nach OMAR [19] hierbei in grober Näherung:

- induzierte Verluste durch Beschleunigung des Nachstroms: 60 %
- Profilreibungsverluste: 30 %
- ungleichmäßige Strömung: 5 - 7 %
- Blattspitzenverluste: 2 - 4 %
- Rotation des Schraubenstrahls: 1 %

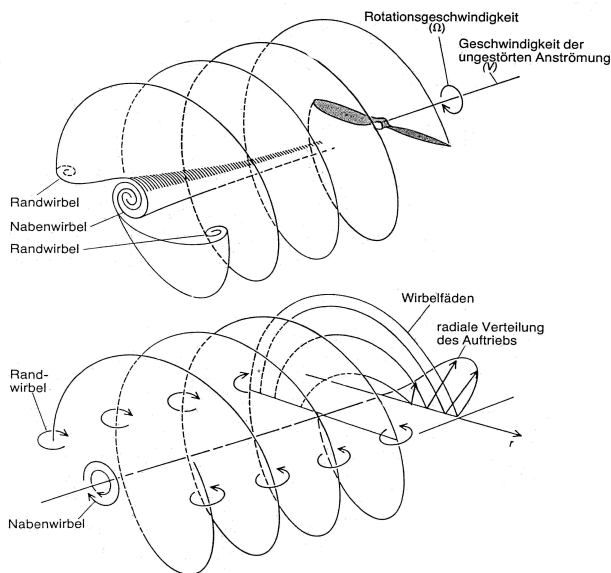


BILD 3: Wirbelschichten an einem Propeller, entnommen aus [1]

Bei Propellervermessungen ergaben sich Leistungswerte, die in etwa 83 % der idealen Werte nach der Impulstheorie (vgl. Abschnitt 2.4.5 und 2.5) betragen und je nach Anströmbedingungen (Reynoldszahl, Machzahl) und Propellerbelastung leicht variieren.

## 2.2 Propellertheorien und Verfahren

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Propellertheorie zwischen stationärer und instationärer Theorie, wobei für schwach belastete Propeller die Ergebnisse der stationären Theorie trotz Vernachlässigung sämtlicher zeitlicher Effekte nach ISAY [2] im allgemeinen mit Messungen gut übereinstimmen. Neben der recheneffizienten Simulation von Propellern mittels eines Wirkungsscheibenansatzes existieren zur konkreten geometrischen Auslegung der Propellerblätter in der stationären Theorie heute vielfältige Entwurfsmethoden in Form von Blattelementverfahren mit Hilfe von Traglinien-, Tragflächen- sowie Wirbelleiter- und Wirbelflächenverfahren [2],[4],[5].

Klassische Ansätze der Propellertheorie für Traglinienverfahren zur Berechnung sogenannter Optimalpropeller mit einer Zirkulationsverteilung mit minimalen induzierten Verlusten basieren auf der Betz-Bedingung [9]. Nach dieser ergibt sich der geringste Energieverlust eines Propellers, wenn sich die von jedem Propellerblatt erzeugte Schraubenfläche mit konstanter Geschwindigkeit starr nach hinten wegbewegt. Eine Näherungslösung für die Zirkulationsverteilung eines die Betz-Bedingung erfüllenden Propellers wurde von L. PRANDTL [7] und eine exakte Lösung von S. GOLDSTEIN [10] gefunden. Diese Ansätze beruhen wie die meisten daraus abgeleiteten Verfahren von LARRA-

BEE [8] sowie ADKINS und LIEBECK [13] auf der Annahme leicht belasteter Propeller und vernachlässigen die Kontraktion und Aufrollung des Nachlaufs, wodurch sie auf bestimmte Schubleistungsgrade und Fortschrittsgrade beschränkt sind. Zudem bleiben Reibungseinflüsse auf die optimale Zirkulationsverteilung unberücksichtigt. Von THEODORSEN [12] wurde die Betz-Bedingung auf stark belastete Propeller übertragen. Der Einfluß der Blattrreibung auf die optimale Zirkulationsverteilung wird bei CHATTOT [15] durch Korrekturterme eingebunden und von EPPLER [16] die Unterschiede gegenüber der reibungsfrei optimierten Zirkulationsverteilung für verschiedene Schubleistungs- und Fortschrittsgrade aufgezeigt. Tendenziell wird durch Berücksichtigung der Reibungseinflüsse am Propellerblatt die Belastung von der Blattspitze zur Blattwurzel hin verschoben. Die Ermittlung der optimalen Zirkulationsverteilung zur Erzeugung des größtmöglichen Schubs für ein vorgegebenes Propellerdrehmoment erfolgte in beiden Ansätzen über eine Variationsrechnung.

## 2.3 Verwendete Propellerauslegungsprogramme

### PROPPY

Zur Auslegung des Propellers für den *Luftwurm 2.0* kam zum einen das Propellerauslegungsprogramm PROPPY von M. HEPERLE [17] zum Einsatz. Dieses basiert auf einem von E. E. LARRABEE im Jahr 1979 veröffentlichten SAE Technical Paper [8] und verwendet im Entwurfsmodus die Blattelementtheorie mit Prandtl'scher Mittelwertsfaktorkorrektur zur näherungsweisen Modellierung der gegenseitigen Blattbeeinflussung sowie des Auftriebsabfalls zu den Blattspitzen hin. Im Nachrechenmodus kommt ein modifiziertes Tragflügelverfahren zum Einsatz. Die genaue Form des Nachlaufs wird in diesem Programm vernachlässigt und sein globaler Einfluß aus der Aussage der Strahltheorie über die Zusatzgeschwindigkeiten in der Propellerebene bestimmt. Das Propellerblatt wird in radialer Richtung in einzelne, als zweidimensional umströmt betrachtete Elemente unterteilt. Die in diesem Programm getroffenen Voraussetzungen gelten streng nur für Propeller mit geringem Belastungsgrad  $T_C$  (Propellerschub bezogen auf Staudruck und Propellerfläche) mit Werten für  $T_C$  kleiner als Eins, da bei höheren Belastungsgraden auch die Nachlaufform von Bedeutung ist und nicht vernachlässigt werden sollte.

### XROTOR

Begleitend wurde das Programm XROTOR [18] von M. DRELA verwendet. Es ist wie PROPPY für die Berechnung sowohl frei angeströmter als auch ummantelter Propeller sowie Windflügel geeignet. Das interaktiv

zu bedienende Programm bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Modifikation des gegenwärtigen Entwurfs, womit dieser sich sehr schnell für geänderte Rahmenbedingungen untersuchen und gegebenenfalls anpassen läßt. Das Propellerblatt wird mittels klassischem Traglinienverfahren modelliert, wobei zur Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten verschiedene Verfahren zur Auswahl stehen. Zum einen ist dies wie in PROPPY die auf LARRABEE basierende Theorie unter Verwendung des Prandtl'schen Mittelwertfaktors. Die Annahme kleiner Fortschrittsgrade und/oder vieler Blätter schränken dieses zwar schnelle Berechnungsverfahren jedoch auf Fortschrittsgrade kleiner 0.5 ein. Eine Erweiterung zu GOLDSTEINS 2 und 4-Blatt Ansatz, welche für alle Blattzahlen, Belastungs- und Fortschrittsgrade Gültigkeit besitzt, stellt der modernere potentialtheoretische Ansatz dar, welcher die Potentialströmung im festen spiralförmigen Nachlaufsystem berechnet. Die induzierten Geschwindigkeiten werden hierbei durch numerisches Lösen des exakten Störpotentials ermittelt, wobei eine Korrektur 1. Ordnung zur Erfassung der Steigungsänderung der Hinterkantenwirbelflächen aufgrund deren Selbstinduktion verwendet wird. Dies ist vor allem bei der Berechnung stark belasteter Propeller und Windkraftanlagen von Bedeutung. Dieses zwar aufwendigere Verfahren bietet zudem die Möglichkeit der Berücksichtigung von Spinnern und Motorhauben, die mit dem Prandtl'schen Mittelwertfaktor nur unzulänglich behandelt werden können.

## 2.4 Entwurfsparameter

In den beschriebenen Propellerauslegungsprogrammen stehen 8 Entwurfsparameter zur Verfügung anhand derer ein Propeller mit minimal induziertem Widerstand berechnet wird. Diese Parameter sind im einzelnen:

- Flughöhe
- Fluggeschwindigkeit
- Blattzahl
- Propellerleistung bzw. -schub
- Propellerdurchmesser
- Propellerdrehzahl
- Profilauftriebsbeiwert über dem Propellerradius
- Profilierung

Zu beachten ist hierbei, daß ein stationärer Betrieb des Propellers für einen bestimmten Flugfall bei einer bestimmten Drehzahl nur möglich ist, wenn zwischen Propeller und Antriebswelle ein Drehmomentengleichgewicht besteht, weshalb die Motorkennlinie unter

Berücksichtigung eines eventuell vorhandenen Untersetzungsgetriebes für genauere Auslegungen möglichst schon im Entwurfsprozeß miteinbezogen werden sollte.

Im folgenden sollen diese Entwurfsparameter und ihr Einfluß auf die Propellerauslegung im allgemeinen und für den Operationsbereich des *Luftwurm 2.0* kurz vorgestellt werden.

### 2.4.1 Flughöhe

Als Stationierungshöhe bietet sich für eine Höhenplattform eine Flughöhe von etwa 20 km an. Dieser Bereich liegt zum einen außerhalb des gewerblich genutzten Luftraums, zum anderen weisen die Winggeschwindigkeiten über das Jahr gesehen dort die geringsten Werte in der unteren Stratosphäre auf. Zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und Überprüfung des Flugverhaltens und der Systemkomponenten auf größerer Skala, wurde der *Luftwurm 2.0* für eine Einsatzhöhe von 15 km konzipiert, wobei kurzzeitige Aufstiege bis auf 20 km möglich sind.

Beim Aufstieg einer Stratosphärenplattform auf ihre Operationsflughöhe in Bereichen um 20 km ändern sich neben Temperatur und Luftdruck auch weitere atmosphärische Größen entscheidend. BILD 4 zeigt den Verlauf wichtiger physikalischer Kenngrößen für den relevanten Flugbereich von Stratosphärenplattformen. Dargestellt ist die starke Höhenabhängigkeit der auf Meeressniveauewerte (Index  $n$ ) bezogenen Größen Luftdruck  $p$ , Luftdichte  $\rho$ , Lufttemperatur  $T$ , Schallgeschwindigkeit  $a$  und kinematische Zähigkeit  $\nu$ . Während Luftdruck und -dichte im hauptsächlich anvisierten Flugbereich bis 15 km auf grob 15 % ihrer Werte auf Meeressniveau abnehmen, erhöht sich die für die Reynoldszahl wichtige kinematische Zähigkeit  $\nu$  der Luft um Faktor 5. In 20 km Höhe liegen nur noch etwa 7 % der Meeressniveauewerte für Luftdruck und -dichte sowie Faktor 11 für die kinematische Zähigkeit vor. Die Lufttemperatur und entsprechend die Schallgeschwindigkeit nehmen in der *Troposphäre* linear mit der Höhe ab, um danach eine Zeitlang in der *Stratosphäre* konstante Werte anzunehmen, bevor sie wieder ansteigen.

Durch die Änderung der Luftdichte operiert die Propeller-Antriebs-Kombination bei einem Auf- und Abstieg aufgrund der Höhenabhängigkeit der Antriebskomponenten laufend unter verschiedenen Betriebspunkten. Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe verursacht Kompressibilitätsprobleme insbesondere im Blattspitzenbereich. Die extreme Zunahme der kinematischen Zähigkeit führt zur drastischen Verringerung der Blatt-Reynoldszahlen und damit der Profilleistung mit eventuell zusätzlichen Problemen durch auftretende instationäre Ablöseblasen und Schwingungen der Propellerblätter.

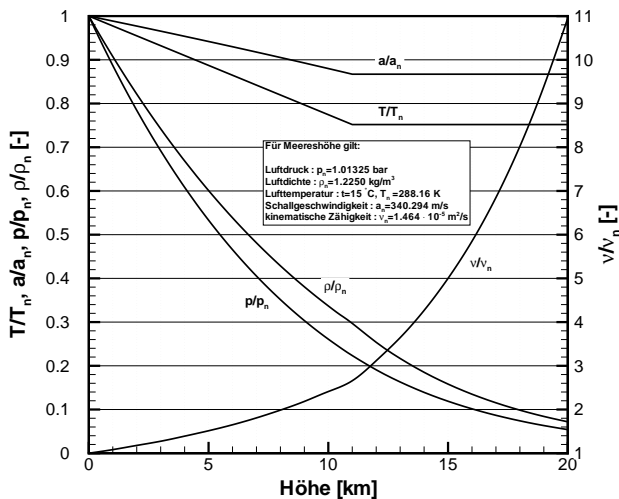


BILD 4: ICAO-Normatmosphäre

### 2.4.2 Auslegungsgeschwindigkeit

Beim *Luftwurm* wird der Antrieb nicht direkt zur Auftriebserzeugung benötigt, sondern dient in erster Linie zur Positionshaltung und zur Erzeugung des zur Stabilisierung der mehrsegmentigen Plattform notwendigen differentiellen Schubs. Somit sind zur Bemessung des Antriebsstranges die in der jeweiligen Flughöhe vorherrschenden Windgeschwindigkeiten und für den Betrieb der endgültigen Station strenggenommen auch deren Häufigkeitsverteilung über das Jahr hin entscheidend.

Zur Gewinnung von Wetterdaten aus größeren Höhen werden heute unter anderem Wetterballone eingesetzt, die in regelmäßigen Abständen von mehreren Bodenstationen weltweit bis zu 30 km aufsteigen und dabei Daten wie Höhe, Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung übermitteln. BILD 5 zeigt die gemittelten monatlichen Windgeschwindigkeiten der von Stuttgart aufgestiegenen Radiosonden in einer Flughöhe von 15 km über einen längeren Zeitraum. Die über das Jahr gemittelten Windgeschwindigkeiten sind in den Monaten April bis September am geringsten und liegen dort im Bereich von 8 bis 14 m/s, während sie in den Wintermonaten bis etwa 22 m/s liegen. Kurzzeitige Maximalgeschwindigkeiten können dabei in den Sommermonaten bis zu 30 m/s, im Winter auch bis zu 60 m/s betragen, wobei diese oft auf ein sehr kleines Höhenband begrenzt sind und durch geringes vertikales Versetzen des *Luftwurm* diese Effekte abgemindert werden können.

Die Anströmgeschwindigkeit zusammen mit der Drehzahl legt die Steigungsverteilung des Propellers fest. Starrpropeller hoher Steigung mögen zwar im Auslegungspunkt einen guten Wirkungsgrad erzielen, jedoch bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten zum Strömungsabrisß neigen. Die besten Allroundpropeller haben in

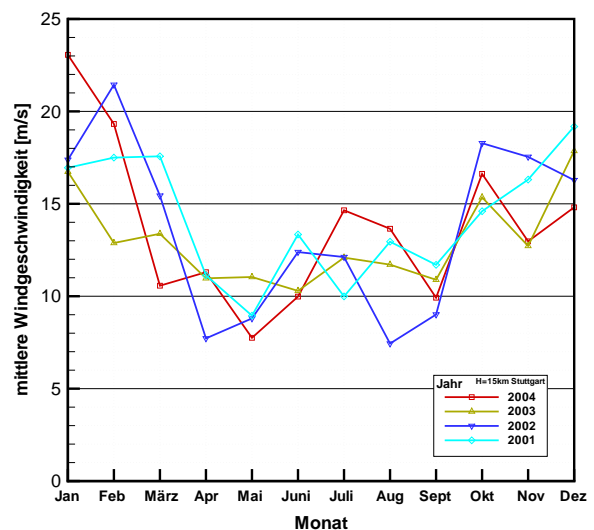


BILD 5: Mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten über Stuttgart, Flughöhe: 15 km

der Regel ein Steigungs-Durchmesser-Verhältnis von ungefähr Eins.

### 2.4.3 Blattzahl

Die Blattzahl hat nur einen geringen Einfluß auf den Wirkungsgrad. Propeller höherer Blattzahl schneiden aufgrund der gleichmäßigeren Leistungs- und Schubverteilung auf den Nachlauf gewöhnlich etwas besser ab. Bei vorgeschriebenem Leistungs- bzw. Schubbedarf führt dies jedoch bei Beibehaltung der Blattauftriebsbeiwerte zu schmälere Blättern, wobei sowohl strukturelle als auch aerodynamische Grenzen durch Verringerung der Blatt-Reynoldszahlen gegeben sind. Gegenüber einem Zweiblattpropeller weist die Dreiblattvariante ein besseres dynamisches Verhalten auf. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch das Gewicht und der Aufwand insbesondere bei Einsatz einer Blattverstellung.

Bei den meisten derzeitigen Höhenplattformen, die in ähnlichen Höhen- und Geschwindigkeitsbereichen operieren wie der *Luftwurm*, wird eine Zweiblattauführung verwendet, die hinsichtlich Wirkungsgrad und Strukturmasse die beste Lösung darstellt.

### 2.4.4 Propellerleistung bzw. -schub

Der erforderliche Propellerschub muß für eine stationäre Positionierung des *Luftwurm* zur Kompensation des Luftschiffwiderstands unter den momentanen Anströmbedingungen ausreichen. Diesbezüglich kann eine Abschätzung anhand der in Windkanal- und Verzögerungsversuchen in den dreißiger Jahren an ähnlichen Luftschiffen gewonnenen Daten durchgeführt werden.

### 2.4.5 Propellerdurchmesser

Nach der Impulstheorie strebt der ideale Wirkungsgrad nach Gl. 1 gegen den idealen Wert Eins, wenn der Belastungsgrad  $T_C$  als Verhältnis von Propellerschub zum Produkt aus Staudruck und Propellerkreisfläche gegen Null geht. Dies bedingt zur Erzielung möglichst hoher Propellerwirkungsgrade demnach große Propeller mit geringer Schubbelastung, die ihre Leistung auf ein hohes Luftvolumen umsetzen. Diesem Trend sind jedoch sowohl aus struktureller als auch aus aerodynamischer Sicht Grenzen gesetzt. Zum einen werden aufgrund der abnehmenden Blattiefen die Bauhöhen für den Holm geringer, zum anderen nehmen auch die Blatt-Reynoldszahlen ab, wodurch höhere Profilverluste auftreten (siehe Kapitel 2.6).

$$(1) \quad \eta_{ideal} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + T_C}}$$

### 2.4.6 Propellerdrehzahl

Zur Abschätzung von Kompressibilitätseffekten soll die an den Blattspitzen vorliegende Machzahl  $Ma_{TIP}$  untersucht werden. Diese ergibt sich zu

$$(2) \quad Ma_{TIP} = \sqrt{Ma^2 + \left(\frac{\Omega \cdot R}{a}\right)^2}$$

wobei  $Ma$  die Flugmachzahl,  $R$  der Propellerradius,  $a$  die lokale Schallgeschwindigkeit und  $\Omega$  die Winkelgeschwindigkeit ( $\Omega = 2\pi n$ ) des Propellers darstellt. Zur Vermeidung von aerodynamischen Verlusten sowie zusätzlicher struktureller und akustischer Belastungen aufgrund von Kompressibilitätseffekten sollte die Blattspitzenmachzahl  $Ma_{TIP}$  möglichst gering sein. Durch Umformung von Gl. (2) erhält man die Maximaldrehzahl  $n_{max}$  in Abhängigkeit einer vorgegebenen, maximal zulässigen Blattspitzenmachzahl  $Ma_{TIP}$  bei einer Fluggeschwindigkeit  $v$  zu:

$$(3) \quad \begin{aligned} n_{max} &= \frac{30a}{\pi R} \sqrt{Ma_{TIP}^2 - Ma^2} \\ &= \frac{30a}{\pi R} \sqrt{Ma_{TIP}^2 - \left(\frac{v}{a}\right)^2} \end{aligned}$$

Diese ist in Abbildung 6 für drei verschiedene Blattspitzenmachzahlen bei einer Auslegungsgeschwindigkeit von 13 m/s in Abhängigkeit des Propellerradius dargestellt. Insgesamt betrachtet hat die Machzahlproblematik beim *Luftwurm 2.0* eine eher untergeordnete Bedeutung.

### 2.4.7 Auftriebsbeiwert und Profilpolare

Zur Erzielung guter Propellerwirkungsgrade müssen die einzelnen Blattschnitte bei möglichst hohen Profilleitzahlen betrieben werden. Der von den Auslegungsprogrammen berechnete auf den Propellerradius bezogene Blattiefenverlauf  $c/R$  ist dabei umgekehrt

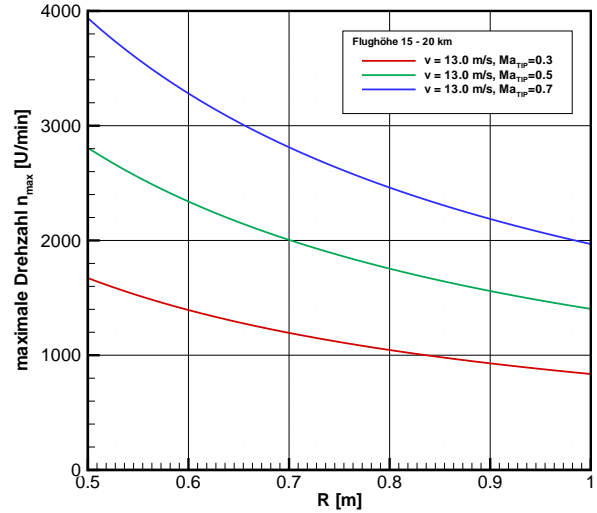


BILD 6: Maximale Propellerdrehzahl über dem Propellerradius in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit und der zulässigen Blattspitzenmachzahl  $Ma_{TIP}$

proportional zum Auftriebsbeiwert. Der genaue Verlauf des Auftriebsbeiwerts über den Blattradius ist an den jeweiligen Betriebsfall anzupassen. So wird hinsichtlich des Schallpegels und der auftretenden Kompressibilitätseffekte im Blattspitzenbereich das Maximum der Zirkulation zur Nabe hin verlagert und der Auftriebsbeiwert im Blattspitzenbereich abhängig von Machzahleffekten verringert.

Typische Profile erreichen ihre Maximalgleitzahl bei Auftriebsbeiwerten von etwa 0,7 und darüber. Eine Erhöhung des Auftriebsbeiwerts führt jedoch bei sonst gleichen Parametern gleichzeitig zu einer Verringerung der Blattiefen und damit auch der Reynoldszahl. Dieser kommt insbesondere bei Werten unter 100 000 ein entscheidender Einfluß auf die Profilgrenzschichtentwicklung mit eventuell auftretenden Ablösungen und damit einhergehendem massiven Widerstandszuwachs zu. Deshalb sind Höhenpropeller eher mit niedrigeren Auslegungsauftriebsbeiwerten ausgelegt, was dann zur Erreichung des gewünschten Schubs größere Blattiefen erfordert. Für die aufgrund der großen Flughöhe und niedrigen Fluggeschwindigkeit erwarteten kleinen Reynoldszahlen kommen daher vorwiegend Profile aus dem Bereich langsam fliegender Modellflugzeuge in Frage, die relative Dicken von ungefähr 8 % aufweisen und für Reynoldszahlen bis hinunter zu Werten von 40 000 mit akzeptablen Leistungen eingesetzt werden.

## 2.5 Idealer Propellerwirkungsgrad

Zur groben Abschätzung des maximal erzielbaren Propellerwirkungsgrades soll noch einmal auf die Beziehung für den idealen Wirkungsgrad basierend auf der Impulstheorie nach Gl. 1 zurückgegriffen werden. Für



stationären Flug muß der Propellerschub gerade dem Luftschiffwiderstand entsprechen, der bei Luftschiffen proportional dem volumenbezogenen Luftschiffwiderstandsbeiwert  $c_{wV}$  sowie dem mit  $2/3$  potenzierten Luftschiffvolumen  $V$  ist, wobei der Einfachheit halber der Luftschiffwiderstandsbeiwert hier als konstant angenommen wird. Der ideale Propellerwirkungsgrad wird in Gl. 4 mit der Propellergesamtfläche entsprechend aus den Einzelflächen mehrerer Propeller der Anzahl  $anz_{Prop}$  gebildet und ist abgesehen vom Luftschiffwiderstandsbeiwert nicht mehr abhängig vom Flugzustand.

$$(4) \quad \eta_{ideal} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{T}{anz_{Prop} q \pi R^2}}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{c_{wV} V^{\frac{2}{3}}}{anz_{Prop} \pi R^2}}}$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 7 aufgetragen für zwei verschiedene Luftschiffwiderstandsbeiwerte und Anzahl der Propeller, auf die der Gesamtschub zu verteilen ist.

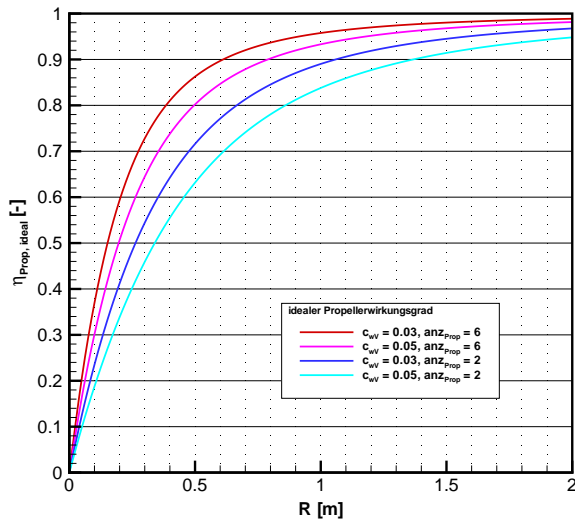


BILD 7: Idealer Propellerwirkungsgrad in Abhängigkeit des Propellerradius sowie des volumenbezogenen Luftschiffwiderstandsbeiwertes und der Propelleranzahl

## 2.6 Parametervariation

Zur Untersuchung des Einflusses einiger der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Entwurfparameter auf das Leistungsverhalten eines Propellers, wurden mit XROTOR mehrere Parameterstudien durchgeführt. Hierbei wurden unter anderem für einen vorgegebenen Betriebspunkt des Propellers in Form von Flughöhe, Auslegungsgeschwindigkeit, Blattzahl, Profilierung und erforderlichem Schub der Auftriebsbeiwert und Propel-

lerradius variiert und die Drehzahl zur Erreichung eines stationären Flugzustandes falls möglich angepaßt. In Bild 8 ist der mit dem besten Entwurf normierte Propellerwirkungsgrad einer solchen Variationsrechnung für eine Blattzahl dargestellt. Entsprechend der Impulstheorie liegt das Wirkungsgradoptimum bei möglichst großen Propellerdurchmessern und der Auftriebsbeiwert bei möglichst hohen Auftriebsbeiwerten des verwendeten Profils im Bereich der maximalen Profilgleitzahl, wobei beiden Trends durch geringer werdende Blatttiefen und die damit abnehmende Reynoldszahl und Verschlechterung der Profilbeiwerte Grenzen gesetzt sind. Der Verlauf der Reynoldszahl für die beschriebene Variationsrechnung entsprechend Bild 9 zeigt diese Tendenz. Zur besseren Kennzeichnung der Reynoldszahlen im unteren Bereich ist die Re-Zahl von 80 000 zusätzlich farbig hervorgehoben.

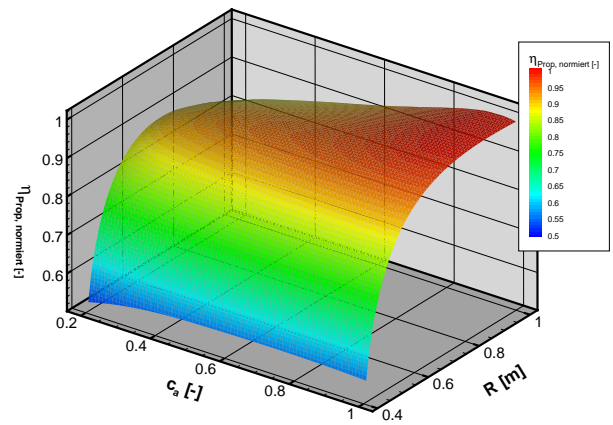


BILD 8: Normierter Propellerwirkungsgrad in Abhängigkeit von Propellerradius und Auftriebsbeiwert

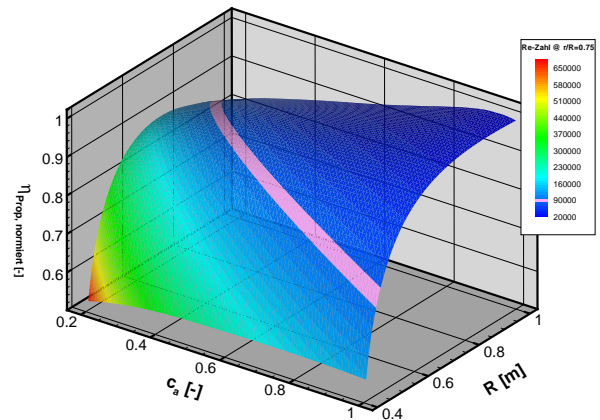


BILD 9: Verlauf der Reynoldszahl für Variation nach BILD 8. Die Reynoldszahl von 80 000 ist zur Erhöhung der Übersichtlichkeit hervorgehoben

## 3 Profilentwurf

Anhand der durchgeführten Parameterstudien in Abschnitt 2.6 konnten erste Vorentwürfe selektiert werden. Für diese wurden die in den Offdesignpunkten und bei Einsetzen der Regelung zur Erzeugung des differentiellen Schubs erforderliche Verteilung der Auftriebsbeiwerte entlang des Blattradius und die dabei vorliegenden Reynoldszahlen für verschiedene Anströmzustände ermittelt werden. Im folgenden soll nun auf die Strömungsphänomene bei den kleinen vorliegenden Reynoldszahlen eingegangen und unter Berücksichtigung struktureller Anforderungen ein speziell angepaßter Profilstrak entworfen werden.

### 3.1 Profilmströmung bei kleinen Reynoldszahlen

Die Profilentwicklung wird neben Struktur- und Bauwerksforderungen sowie dem gewünschten Abrißverhalten und Profilmoment hauptsächlich durch die Minimierung des Profilwiderstands im geforderten Auftriebsbeiwertbereich geprägt. Der Profilwiderstand setzt sich dabei aus zwei Komponenten zusammen. Dies ist zum einen der durch die viskosen Schubspannungen tangential zur Profiloberfläche entstehende Reibungswiderstand, zum anderen der durch die Verdrängungseffekte der Grenzschicht hervorgerufene Formwiderstand. Bei Reynoldszahlen unter 1 Million tragen transitionelle Ablöseblasen im hinteren Profilschnitt erheblich zum Formwiderstand bei, für Reynoldszahlen unter 150 000 dominiert dieser sogenannte Blasenwiderstand oft den Gesamtwiderstand.

Ein komplettes Unterdrücken der Blase durch sehr frühen Umschlag ist jedoch auch nicht wünschenswert, um keine Einbußen aufgrund des höheren turbulenten Profilreibungswiderstands hinnehmen zu müssen. Ein optimaler Umschlagspunkt für Profilmströmungen bei kleinen Reynoldszahlen liegt in der Regel etwas stromauf des laminaren Ablösepunktes, der mit dem Anstellwinkel wandert. Der treibende Faktor ist nun, den Umschlag möglichst genau an diesem Punkt oder zumindest in der Nähe über einen möglichst großen Einsatzbereich des Profils zu erreichen, damit die abgelösten Scherschichten keinen zu großen Wandabstand aufweisen. Da bei kleinen Reynoldszahlen der Grenzschichtumschlag in der Regel nach dem Ablösepunkt erfolgt, steht die Kontrolle der Blasenverluste eher im Vordergrund als die Minimierung des turbulenten Reibungswiderstandes. Es kann auch vorkommen, daß lange flache laminare Ablöseblasen sich hinsichtlich des Widerstandsbeiwertes günstiger auswirken als ein Umschlag kurz vor der Blase.

Ist die Blase flach, halten sich die Mischungsverluste in Grenzen, oft sind sie sogar noch niedriger als bei Verwendung eines künstlichen Umschlagerzeugers wie

z. B. eines Turbulators. Aufgrund der starken Auftriebsbeiwertänderungen am Propellerblatt bei verschiedenen Fluggeschwindigkeiten bzw. Regelungseingriffen sowie erhebliche Variation der Reynoldszahl bedingt durch den großen zu überbrückenden Höhenbereich ist eine nur für einen Betriebspunkt optimale Turbulatorlösung wenig sinnvoll. Durch das Wandern der Blase bei Anstellwinkeländerungen kann sich auch der Druckgradient in der Blasenumgebung ändern, wodurch die Grenzschicht entweder schon vor dem Turbulator umschlägt und diesen somit wirkungslos macht oder der Umschlag könnte weit hinter den Turbulator wandern, wodurch unnötige turbulente Grenzschichten erzeugt würden.

Somit zielt der Profilentwurf bei kleinen Reynoldszahlen auf eine Minimierung der Verluste in der transitionellen Ablöseblase ab, wobei zusätzliche Forderungen bezüglich der Struktur und Baubarkeit berücksichtigt werden müssen und gegebenenfalls einschränkend wirken.

### 3.2 Verwendete Polarenprogramme

Zur Bereitstellung theoretischer Profilpolaren kam unter anderem das Eppler'sche Profileprogramm zum Einsatz. Dieses verwendet zum Entwurf von Profilen mit vorgegebener Geschwindigkeitsverteilung eine konforme Abbildung bzw. für die Nachrechnung ein Panelverfahren mit parabolischer Zirkulationsverteilung. Zur Berechnung laminarer wie turbulenter zweidimensionaler Grenzschichten kommt ein Integralverfahren 1. Ordnung mit 3 algebraischen Schließungsbedingungen zur Anwendung.

Ergänzend kam das Programm XFOIL 6.94 von DRELA zur Anwendung. Dieses verwendet zur Berechnung der reibungsfreien Profilmströmung ein Panelverfahren mit linearer Wirbelverteilung der Stromfunktion, wobei die Kuttabedingung als Schließungsbedingung dient. Der Einfluß der Verdrängungswirkung der Grenzschicht auf die Potentialströmung erfolgt durch eine Überlagerung von Quellverteilungen auf Profil und Nachlauf, wobei die Grenzschicht und der Nachlauf mittels Integralverfahren, angewendet auf Impuls- und Energiesatz innerhalb der Grenzschicht, modelliert werden.

### 3.3 Entwurf eines Profilstraks

Exemplarisch soll hier eine mit dem Epplerprogramm entworfene Profilstudie für den radialen Blattschnitt  $r/R=0.3$  vorgestellt werden, deren Kontur und auf die Anströmgeschwindigkeit bezogene potentialtheoretische Geschwindigkeitsverteilung auf der Profiloberfläche für mehrere Anstellwinkel in Bild 10 dargestellt ist. Bis zum Staupunkt des Profils findet zunächst eine Verzögerung des Fluids statt. Auf der Profilober-



seite wird es danach mit zunehmendem Anstellwinkel im vorderen Teil immer stärker beschleunigt, wonach im hinteren Teil des Profils die Geschwindigkeit wieder abnimmt, was gleichbedeutend mit einem Druckanstieg ist, der zur Generierung eines geschlossenen Profils notwendig ist. Da die Grenzschicht bei kleinen Reynoldszahlen nur einen sehr geringen Druckanstieg überwinden kann ohne völlig abzulösen, muß dieser zum einen vom Betrag her möglichst gering sein und zum anderen darf er auch nicht zu abrupt erfolgen, wodurch die Dickenrücklage bei diesen Profilen sehr weit vorne liegt.

PROPELLERSTRAK  $r/R = 0.3$

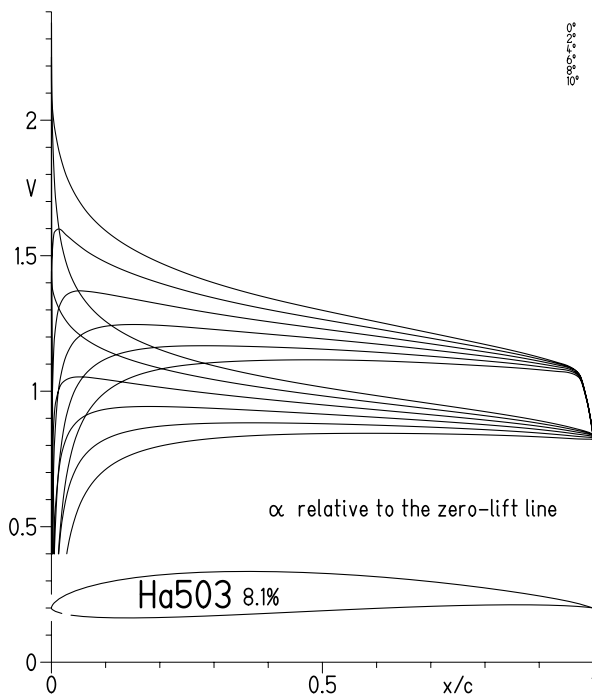


BILD 10: Kontur und potentialtheoretische Geschwindigkeitsverteilung der Profilstudie Ha503 bei  $r/R=0.3$

Auf der Profilerseite folgt im Auslegungsbereich bis zu einem Anstellwinkel von etwa  $8^\circ$  nach einer kurzen Beschleunigung der Strömung im Nasenbereich ein sehr sanfter Druckanstieg über die restliche Profillänge und die Geschwindigkeitsverteilung wurde im Nasenbereich ausgerundet und Saugspitzen vermieden. Bei höheren Anstellwinkeln führt die leichte Ausbildung einer Saugspitze und der direkt daran anschließende konkave Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung auf der Oberseite zu einer günstigen Beeinflussung des frequenzspezifischen Anfachungsverhaltens der Tollmenschlichting Wellen und die Grenzschicht kann in der Regel über eine lange Strecke nahe der "Umschlagsgrenze" gehalten werden, ohne diese zu überschreiten. Die resultierende Polare zeigt Bild 11.

Normalerweise ist es günstig, den Grenzschichtumschlag gerade vor den laminaren Ablösepunkt zu le-

PROPELLERSTRAK  $r/R = 0.3$

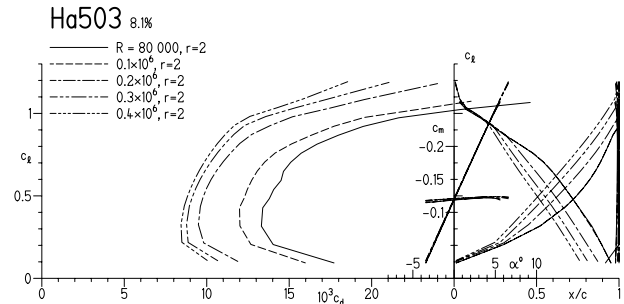


BILD 11: Profilpolare von Ha503 für einen Rauigkeitswert  $r=2$

gen, da eine turbulente Grenzschicht einen höheren Druckanstieg überwinden kann. Bei extrem kleinen Reynoldszahlen erfolgt bei turbulatorfreien Profilen jedoch in der Regel zuerst die laminare Ablösung. Gelingt es jedoch die Blase flach zu halten, ist deren Beitrag zum Widerstand geringer als bei Verwendung eines Turbulators. Zur Abschätzung des Blaseneinflusses auf den Profilwiderstandsbeiwert kann der Verlauf des Formfaktors  $H_{12}$ , gebildet aus Verdrängungs- und Impulsverlustdicke, herangezogen werden.

Der Widerstandszuwachs durch die Blase hängt nicht unbedingt von deren Länge ab. Als Anhaltspunkt für deren negativen Einfluß gibt jedoch der Maximalwert des Formfaktors  $H_{12}$  zumindest näherungsweise Aufschluß. Dieser wird meist kurz vor dem Wiederanlegen der Strömung im Umschlagspunkt innerhalb der Blase erreicht.

Für  $H_{max} < 4$  tritt keine laminare Ablösung und keine Blase auf. Nach DRELA läßt sich der Widerstandszuwachs durch die laminare Ablöseblase bei  $H_{max} > 4$  durch die Beziehung

$$(5) \quad c_{wBlase} = A \cdot (H_{max} - 4)^2$$

approximieren mit einer vom jeweiligen Profil abhängigen Konstanten A.

Als Faustformel für den Einfluß des Blasenwiderstands  $c_{wBlase}$  auf den Gesamtwiderstand  $c_{wGes}$  in Abhängigkeit von  $H_{max}$  gilt:

$H_{max} = 4$	ideal, minimaler Widerstand
$H_{max} = 5$	$c_{wBlase}$ fast vernachlässigbar
$H_{max} = 6$	$c_{wBlase}$ bemerkbar, aber tolerabel
$H_{max} = 7$	$c_{wBlase}$ gewichtiger Faktor von $c_{wGes}$
$H_{max} > 8$	$c_{wBlase}$ dominiert Gesamtwiderstand

Bild 12 zeigt den Verlauf des maximalen Formfaktors  $H_{max}$  für die Profilstudie Ha503 nach einer XFOIL-Rechnung für verschiedene Reynoldszahlen. Der Faktor  $H_{max}$  ändert sich mit dem Anstellwinkel abhängig von der Profildruckverteilung. Er nimmt mit abnehmender Reynoldszahl und zunehmendem Faktor n

immer zu. Für den Profilwiderstandsbeiwert ist es günstig,  $H_{max}$  über den geforderten Auftriebsbeiwertbereich nach Möglichkeit in der Nähe von 4 zu halten.

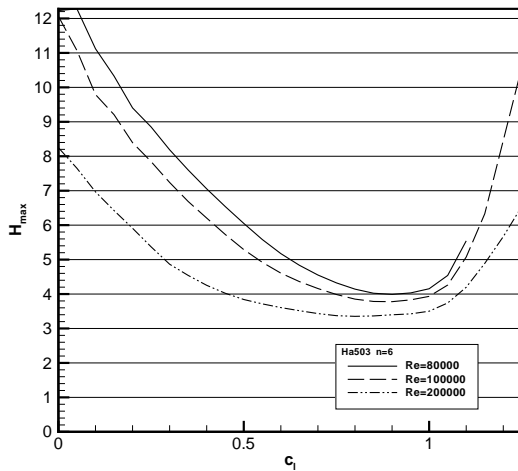


BILD 12: Verlauf des maximalen Formfaktors  $H_{max}$  über dem Auftriebsbeiwert

## 4 Zusammenfassung

Zur Überprüfung der Skalierbarkeit des Luftwurmkonzepts und zur Durchführung von Flugversuchen auf größerer Skala und Test der Systemkomponenten in Flughöhen um 15 - 20 km ist der *Luftwurm 2.0* vorgesehen. Für diesen wurden die zur Kompensation des Luftschiffwiderstands und zur Erzeugung des für die Stabilisierung des mehrsegmentigen Luftschiffkonzepts notwendigen Propeller entworfen.

Die zum Entwurf eingesetzten Blattelementverfahren setzen das Propellerblatt aus als zweidimensional betrachteten Blattelementen zusammen, wodurch Strömungseffekte in radialer Richtung vernachlässigt werden. In Untersuchungen an Windkraftanlagen zeigte sich, daß sich die Rotationseffekte hauptsächlich auf den maximal erzielbaren Auftriebsbeiwert, nicht aber merklich auf den Auftriebsgradienten und Nullauftriebswinkel auswirken. Inwieweit sich die Radialströmung bei den kleinen vorliegenden Reynoldszahlen insbesondere in den großen Flughöhen auf den laminar-turbulenten Umschlag der Profilumströmung auswirkt, soll nach Möglichkeit in Propellerhöhentests mit Superpressureballonen geklärt werden.

Von besonderer Bedeutung auf die effektiven Schubvektoren der Propeller und die Druckverteilung der Luftschiffhülle und damit das Flugverhalten des *Luftwurm* sind die nicht zu vernachlässigenden Interferenzeffekte zwischen Hülle und Antriebseinheiten. Diese können neben Freiflugversuchen für eine Adaption der Flugregler in Windkanalversuchen und numerischen Strömungssimulationen untersucht werden.

## Literatur zum Stand der Forschung

- [1] E. E. LARRABEE: *Propeller*. Spektrum der Wissenschaft, September 1980.
- [2] W. H. ISAY: *Propellertheorie*. Hydrodynamische Probleme, Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1964.
- [3] W. H. ISAY: *Moderne Probleme der Propellertheorie*. Hydrodynamische Probleme, Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1970.
- [4] J. P. BRESLIN UND P. ANDERSEN: *Hydrodynamics of Ship Propellers*. Cambridge University Press, 1994.
- [5] A. S. OLSEN: *Optimisation of Propellers Using the Vortex-Lattice Method*. PhD Thesis, Technical University of Denmark, Maritime Engineering, 2001. ISBN 87-89502-58-2.
- [6] H. GLAUERT: *Die Grundlagen der Tragflügel und Luftschraubentheorie*. Springer Verlag, Berlin, 1929.
- [7] L. PRANDTL, A. BETZ: *Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik*. Nachdruck Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen e. V., 1944.
- [8] E. E. LARRABEE: *Practical Design of a minimum loss Propeller*. SAE Technical Paper 790585, 1979.
- [9] L. PRANDTL UND A. BETZ: *Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust*. Göttinger Nachrichten, 1919.
- [10] S. GOLDSTEIN: *On the Vortex Theory of Screw Propellers*. Proc. of the Royal Society (A) 123, 440, 1929.
- [11] C. LOCK: *Application of Goldsteins Airscrew Theory to Design*. Aeronautical Research Committee, RM 1377, Nov. 1930.
- [12] T. THEODORSEN: *Theory of Propellers*. McGraw-Hill Publications in Aeronautical Science, 1948.
- [13] C. N. ADKINS, R. H. LIEBECK: *Design of Optimum Propellers*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct. 1994.
- [14] A. B. BAUER: *A New Look at Optimum Propeller Performance - Going from the Prandtl F Factor to a Vortex-Induced Downwash Analysis*. World Aviation Congress, October 13-16, 1997, Anaheim, CA.
- [15] J. J. CHATTOT: *Optimization of Propeller using Helicoidal Vortex Model*. Computational Fluid Dynamics JOURNAL, Vol. 10, No. 4, January 2002, pp. 429-438.
- [16] R. EPPLER: *Optimum Propellers with Viscous Effects*. To be published.
- [17] M. HEPPELE: *Ein Computerprogramm für Entwurf und Analyse von Propellern*. Diplomarbeit, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 1984.
- [18] M. DRELA: *XROTOR User Guide*. MIT, August 1996.
- [19] OMAR: <http://www.eng.upm.edu.my/aao/week2/week2.htm>.