

Theoretische Untersuchungen zur Minimierung des aerodynamischen Widerstandes von Luftschiffrümpfen

Th. Lutz¹, U. Rüger² und S. Wagner¹

Übersicht. Es wurde ein Verfahren zur Formoptimierung axial angeströmter Rotationskörper entwickelt. Die Methode verwendet eine linear variierende Quellverteilung auf der Achse, wobei die Quellstärken an den Abschnittsgrenzen die Entwurfsvariablen darstellen. Basierend auf der potentialtheoretischen Geschwindigkeitsverteilung wird eine Grenzschichtberechnung zur Ermittlung des Reibungswiderstandes durchgeführt. Die Koppelung des aerodynamischen Berechnungsmodells mit einer Evolutionsstrategie als Optimierungsalgorithmus erlaubt die numerische Optimierung von Luftschiffkörpern. Zur Erfassung des Einflusses eines Heckpropellers auf die Umströmung des stromauf liegenden Rumpfes wurde ein Propellermodell entwickelt und mit dem Rumpfprogramm gekoppelt. Mit Hilfe des gekoppelten Berechnungsverfahrens wird an exemplarischen Beispielen die Druckverteilung und der Widerstand von Luftschiffrümpfen mit Heckantrieb untersucht.

Bezeichnungen

| | |
|------------|---|
| c_P | Leistungsbeiwert des Propellers ($c_P = \frac{P}{\frac{\rho}{2} U_\infty^3 \pi R^2}$) |
| c_p | Druckbeiwert |
| c_T | Schubbeiwert des Propellers ($c_T = \frac{T}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 \pi R^2}$) |
| c_{wV} | volumenbezogener Widerstandsbeiwert |
| n | Anfachungsfaktor |
| P | Propellerleistung |
| R | Propellerradius |
| Re_L | Reynoldszahl (Bezugslänge: Körperlänge) |
| Re_D | Reynoldszahl (Bezugslänge: Körperdurchmesser) |
| Re_V | Reynoldszahl (Bezugslänge: Volumen ^{1/3}) |
| T | Propellerschub |
| U_∞ | Anströmgeschwindigkeit |
| V | Volumen |
| W | Widerstand |
| η | Wirkungsgrad des Propellers ($\eta = \frac{c_T}{c_P}$) |
| λ | Fortschrittsgrad des Propellers |
| ν | kinematische Zähigkeit |
| ρ | Dichte |
| ω | Rotationsgeschwindigkeit des Propellers |

1 Einleitung

Zur Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit von Luftschiffen ist bei der Auslegung auf eine Minimierung von Gewicht und erforderlicher Antriebsleistung zu achten. Der Antriebsbedarf hängt dabei wesentlich vom aerodynamischen Widerstand des Rumpfes ab, der ungefähr 2/3 des Gesamtwiderstandes ausmacht. Selbst eine kleine Reduktion des Rumpfwiderstandes kann zu einer merklichen Treibstoffeinsparung führen, was sich in einer erhöhten Nutzlast oder einer größeren Reichweite des Luftschiffes niederschlägt.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit sich der Widerstand von axial angeströmten Rotationskörpern in inkompressibler Strömung durch Formgebung alleine reduzieren läßt. Dabei wird die Minimierung des Widerstandes bei maximalem Körpervolumen und gegebener Anströmgeschwindigkeit angestrebt. Eine detaillierte Darstellung der bei der Optimierung verwendeten Berechnungsverfahren findet sich in [15] und [9]. Die Widerstandsreduzierung durch aktive Maßnahmen, wie Grenzschichtabsaugung, war nicht Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen. Es wird hierzu auf die umfangreichen Arbeiten von Goldschmid (z. B. [3]) verwiesen.

Neben einer widerstandsoptimierten Gestaltung von Luftschiffumpf und Anbauten kann sich die Verwendung eines Heckpropellers günstig auf die benötigte Antriebsleistung auswirken. Zur Erfassung des Einflusses eines Heckantriebes auf die Umströmung stromauf liegender Verdrängungskörper wurde ein Modell zur Berechnung des vom Propeller induzierten, zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeldes entwickelt. Die theoretischen Grundlagen des neuen Propellermoduls sind ausführlich in [10] beschrieben.

2 Vorüberlegungen zur Widerstandsminimierung von Luftschiffrümpfen

Ziel bei der aerodynamischen Optimierung eines Luftschiffes ist zunächst die Minimierung des erforderlichen Leistungsbedarfes um eine bestimmte Nutzlast mit einer vorgegebenen Fluggeschwindigkeit zu transportieren. Setzt man vereinfachend voraus, daß die Effizienz des Antriebes konstant ist und die Nutzlast proportional zum Luftschiffvolumen und damit proportional zum statischen Auftrieb ist, so läßt sich obiges Optimierungsziel in folgende Fragestellung umformulieren: Welche Luftschiffkonfiguration hat bei vorgegebener

¹ Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 21, 70550 Stuttgart

² Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 27, 70550 Stuttgart

Geschwindigkeit und Volumen den geringsten Widerstand? Zur Untersuchung dieser Fragestellung sind bei Vergleichen verschiedener Konfigurationen nachfolgend definierte dimensionslose Kennzahlen relevant:

Volumenbezogene Reynoldszahl:

$$Re_V = \frac{U_\infty V^{1/3}}{\nu} \quad (1)$$

Volumenbezogener Widerstandsbeiwert:

$$c_{wV} = \frac{W}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 V^{2/3}} \quad (2)$$

Als Bezugslänge ist bei diesen Kennzahlen die Kubikwurzel des Luftschiffvolumens V zu verwenden. Eine inkonsistente Wahl der Bezugsgrößen, z. B. Luftschifflänge bei Reynoldszahl und $V^{1/3}$ beim Widerstandsbeiwert, führt zu falschen Ergebnissen beim Widerstandsvergleich (vgl. [14]).

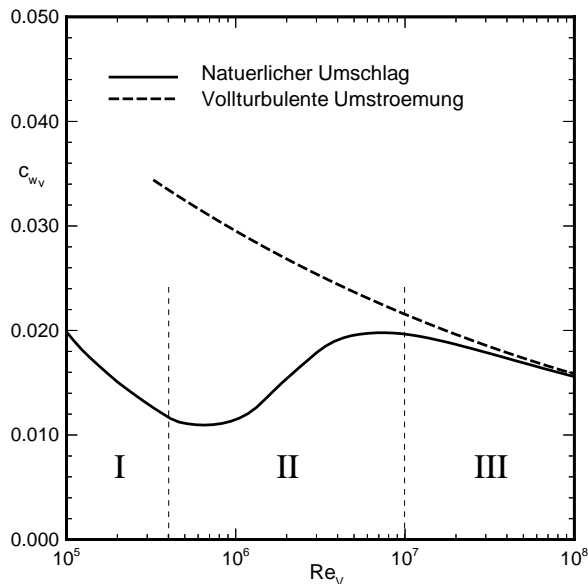


Abbildung 1. Widerstandsverlauf für einen axial angeströmten Rotationskörper

Trägt man nun den volumenbezogenen Widerstandsbeiwert für einen axial angeströmten Rotationskörper über Re_V auf, so ergibt sich typischerweise ein Verlauf wie er in Abb. 1 dargestellt ist. Bei kleinen Reynoldszahlen (Bereich I, $Re_V \lesssim 5 \cdot 10^5$) liegt der Widerstandsbeiwert für den Fall des natürlichen Grenzschichtumschlages (ausgezogene Linie) deutlich unterhalb des Verlaufes für nahezu vollturbulente Körperumströmung (gestrichelte Linie). In diesem Bereich sind ausgedehnte laminare Laufstrecken möglich, was mit einem sehr kleinen Reibungswiderstand verbunden ist. Bei einer Erhöhung der Re -Zahl wandert der Umschlagspunkt mehr oder weniger schnell in Richtung Körperröhre, wodurch der Widerstandsbeiwert ansteigt. Zu Beginn dieses Übergangsbereiches (Bereich II, $5 \cdot 10^5 \lesssim Re_V \lesssim 10^7$) sind die größten Widerstandseinsparungen durch Laminarhaltung möglich. Das Gebiet großer Reynoldszahlen (Bereich III, $Re_V \gtrsim 10^7$) ist schließlich dadurch charakterisiert, daß der Körper fast vollständig turbulent umströmt wird.

Eine wichtige Aufgabe der Strömungsmechanik besteht darin, durch die Gestaltung von Körperkontur und zugehöriger Druckverteilung den Grenzschichtumschlag zu verzögern und ausgedehnte laminare Laufstrecken zu realisieren. Dabei ist man im Fall großer Reynoldszahlen weitgehend auf theoretische Untersuchungen angewiesen, da für diesen Bereich nur wenige Experimente bekannt sind.

2.1 Formoptimierung bei Laminarkörpern

Für den Bereich kleiner Reynoldszahlen können sehr einfach ausgedehnte laminare Laufstrecken durch Formgebung erzielt werden. Hierzu ist über ein langes Gebiet ab dem vorderen Staupunkt ein leichter Druckabfall einzuführen (vgl. Körper von Hansen & Hoyt in Abb. 2 und Abb. 3). Der Umschlagspunkt liegt hier im Bereich der maximalen Übergeschwindigkeit. Diese Laminarkörper für kleine Re -Zahlen zeichnen sich durch eine sehr große Dickenrücklage aus.

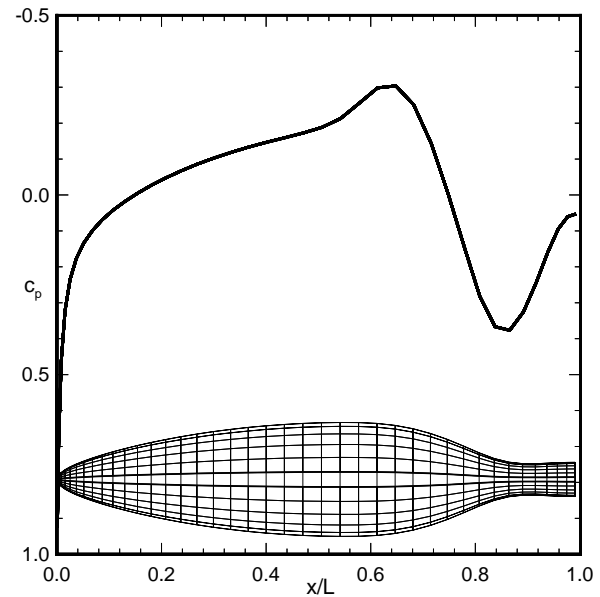


Abbildung 2. Potentialtheoretische Druckverteilung für den Hansen & Hoyt Körper (vgl. [4])

Zur Widerstandsminimierung ist die Körperoberfläche nach dem Strömungsumschlag schnellstmöglich zu verkleinern, da die Wandschubspannung bei turbulenten Grenzschichten vielfach höher als bei laminaren Grenzschichten ist. Dazu ist ein starker Druckanstieg einzuführen, wobei jedoch Ablösungen vermieden werden müssen. Je kleiner die Reynoldszahl, desto weniger Druckanstieg ist möglich und desto schlankere Körper sind zu erwarten.

Bei einer Steigerung der Re -Zahl ist im vorderen Körperbereich ein stärkerer Druckabfall erforderlich, um die Grenzschicht laminar zu halten. Dies kann entweder durch eine Vergrößerung des Körperdurchmessers oder durch eine Vorverlagerung des Punktes maximaler Dicke erreicht werden. Der Vergrößerung des Körperdurchmessers ist durch den maximal möglichen Druckanstieg im hinteren Körperbereich eine Grenze gesetzt. Insgesamt ist zu erwarten, daß bei Steigerung von Re die laminaren Laufstrecken kürzer und das

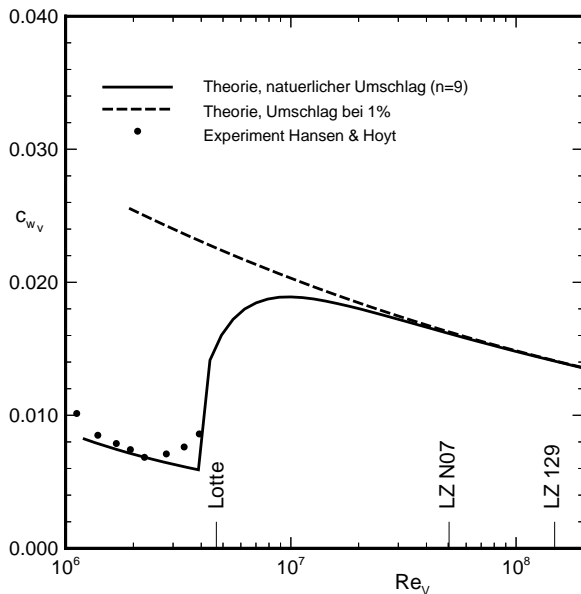


Abbildung 3. Widerstandsverlauf für den Hansen & Hoyt Körper (vgl. [4])

Längen-Durchmesser Verhältnis dieser widerstandsoptimierten Laminarkörper kleiner wird.

Es kann festgehalten werden, daß lediglich bei kleinen unbemannten Luftschiffen ausgedehnte laminare Laufstrecken durch Formgebung theoretisch möglich sind. Fraglich ist jedoch, ob die theoretischen Werte in der Praxis beim Auftreten von Konturunstetigkeiten und Hüllenflattern realisiert werden können. Hierzu sind keine Untersuchungen bekannt. Zudem reduziert die große Dickenrücklage bei Laminarkörpern den Abstand zwischen Leitwerk und Volumenschwerpunkt. Zur Gewährleistung der Flugstabilität des Luftschiffes sind hierdurch u. U. größere Leitwerke erforderlich, die einen entsprechend größeren Reibungswiderstand aufweisen.

2.2 Formoptimierung bei vollturbulenter Körperumströmung

Bei sehr großen, luftschiffrelevanten Reynoldszahlen ($Re_V \approx 5 \cdot 10^7$) sind mit passiven Maßnahmen keine ausgedehnten laminaren Laufstrecken zu erzielen. Für den Fall der vollturbulenten Körperumströmung hängt der hier betrachtete volumenbezogene Widerstandsbeiwert dabei offensichtlich nur sehr wenig von der genauen Geometrie des Rotationskörpers ab. Dies bedeutet, daß bei vorgegebenem Re_V nur sehr kleine Widerstandsreduzierungen durch Formoptimierung möglich sind. Nach umfangreichen Untersuchungen von Hess [6] besteht im wesentlichen eine leichte Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes vom Längen-Durchmesser Verhältnis. Mit Hilfe eines vereinfachten Verfahrens von Truckenbrodt [16], welches keine detaillierte Berechnung der Grenzschichtentwicklung erfordert, wurden von Hess die Widerstandsbeiwerte für eine Vielzahl von Rotationskörpern mit unterschiedlichem L/D ermittelt. Die resultierenden Werte stimmen mit dem für Rotationsellipsoide nach Truckenbrodt analytisch berechenbaren Verlauf praktisch überein. Es ergab sich ein fla-

ches Widerstandsminimum bei einem Längen-Durchmesser Verhältnis von knapp über 3. Leider wurden die Untersuchungen bei konstanter längenbezogener Reynoldszahl Re_L und nicht für konstantes Re_V durchgeführt. Durch diese Inkonsistenz werden schlankere Körper benachteiligt (siehe auch [14]).

Basierend auf einer Näherungsformel von Hoerner [7] wurde daher eine eigene Abschätzung günstiger Längen-Durchmesser Verhältnisse durchgeführt. Für $Re_V = 10^8$ resultierte ein sehr flaches Widerstandsminimum bei Werten von $L/D \approx 5$ bis 6 (vgl. [13]). In diesen Voruntersuchungen wurden weitere passive Maßnahmen zur Widerstandsminimierung bei großen Reynoldszahlen untersucht und mit dem in Abschnitt 3 vorgestellten Nachrechenverfahren überprüft. Durch Einführen eines Druckanstieges nach dem Umschlagspunkt wurde beispielsweise versucht, die Wandschubspannung zu verkleinern und so den Reibungswiderstand in Bereichen großer umspülter Körperoberfläche zu reduzieren. Die untersuchten Ansätze brachten jedoch keine signifikanten Verbesserungen gegenüber konventionellen Körperformen. Es wurde daher entschieden mit Hilfe einer numerischen Optimierung nach weiteren Lösungen zu suchen.

2.3 Einfluß eines Heckpropellers

Durch die Sogwirkung eines am Heck montierten Propellerantriebes wird die Außenströmung im Bereich des Luftschiffhecks beschleunigt. Die hierdurch hervorgerufene Saugkraft am Körper ist stromab gerichtet, so daß – auch bei reibungsfreier Strömung – ein zusätzlicher Druckwiderstand resultiert. Darüberhinaus vergrößert sich auch die Wandschubspannung infolge der größeren Außengeschwindigkeit am Grenzschichttrand. Die Erhöhung des Reibungswiderstandes ist jedoch gegenüber dem zusätzlichen Druckwiderstand vernachlässigbar (siehe z. B. [8], [10]). Bei üblichen Luftschiffgeometrien ist mit einer merklichen Erhöhung des Rumpfwiderstandes zu rechnen. Lediglich bei kleinen Reynoldszahlen kann sich der Heckantrieb positiv auf den Widerstand des Körpers auswirken, indem Grenzschichtablösungen vermieden bzw. stromab verschoben werden.

Auf der anderen Seite arbeitet der heckmontierte Propeller in einem Gebiet reduzierter (axialer) Anströmgeschwindigkeit. Dies führt dazu, daß die zur Erzeugung eines bestimmten Schubes erforderliche Leistung sinkt. Der auf die ungestörte Anströmgeschwindigkeit bezogene Propellerwirkungsgrad $\eta = \frac{TU_P}{P}$ steigt entsprechend. Arbeitet der Propeller teilweise oder ganz im Einflußbereich der Rumpfgrenzschicht (Abb. 4) wird dieser Effekt verstärkt, da die Geschwindigkeit innerhalb der Grenzschicht gegenüber der Außengeschwindigkeit nochmals reduziert ist.

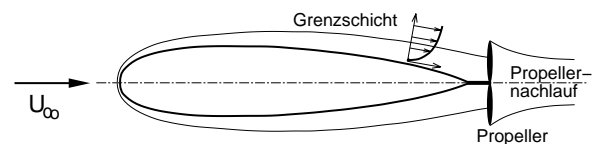


Abbildung 4. Umströmung eines Luftschiffumpfes mit Heckpropeller

Insgesamt überwiegt der letztgenannte Effekt, so daß zur Fortbewegung eines Luftschiffes mit Heckantrieb eine reduzierte Propellerleistung erwartet werden kann. Basierend auf experimentellen Daten wurde für ein auf Heckantrieb umgerüstetes ZSG - 1 Luftschiff ein um 10 % reduzierter Leistungsbedarf ermittelt (siehe [1]). Der aerodynamische Vorteil kann jedoch nur dann voll genutzt werden, wenn bei der Auslegung des Propellers die vom Luftschiffkörper beeinflusste tatsächliche Anströmung berücksichtigt wird.

3 Berechnungsverfahren

3.1 Ermittlung der Außenströmung

Zur Berechnung der potentialtheoretischen Geschwindigkeitsverteilung um vorgelegte Körperformen wird eine 3D-Panelmethode eingesetzt. Bei diesem Nachrechenverfahren werden Quellpanels mit abschnittsweise konstanter Stärke verwendet, wobei die Singularitätenverteilung mit Hilfe der externen Neumann'schen Randbedingung bestimmt wird. Dieser Low-Order Ansatz ist bei entsprechend feiner Diskretisierung völlig ausreichend. Ein modifizierter Bezier-Spline dient zur Interpolation von Geometrie und Geschwindigkeitsverteilung und liefert die für die Grenzschichtrechnung benötigten Eingabedaten. Bei Bedarf kann die Verdrängungswirkung der Grenzschicht mit Hilfe der Transpirationstechnik simuliert werden, wozu eine iterative Koppelung mit dem Grenzschichtverfahren erforderlich ist.

Das bei der Formoptimierung eingesetzte Potentialverfahren basiert auf einer linear variierenden Quellverteilung auf der Achse des Rotationskörpers (siehe [15]). Im Gegensatz zu dem normalerweise gewählten Vorgehen wird bei dieser Methode nicht die Körpergeometrie sondern die Quellstärkenverteilung bei der Optimierung variiert. Die Kontur des Körpers entspricht der Staustromfläche, die sich nach Erfüllung der Schließungsbedingung iterativ ermitteln läßt. Die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung ergibt sich aus der Differentiation von Potential- oder Stromfunktion auf der Körperoberfläche. Das gewählte Vorgehen entspricht im wesentlichen dem von Pinebrook, der Optimierungen des stirnflächenbezogenen Widerstandsbeiwertes durchführte [11].

3.2 Grenzschichtberechnung und Umschlagsermittlung

Basierend auf der potentialtheoretischen Geschwindigkeitsverteilung wird die Ermittlung der Grenzschichtentwicklung mit Hilfe eines Integralverfahrens zur Berechnung laminar bzw. turbulent anliegender Grenzschichten durchgeführt. Die Methode aus [2] wurde dazu auf die Berechnung rotations-symmetrischer Grenzschichten erweitert. Krümmungseffekte werden bei diesem Verfahren 1. Ordnung vernachlässigt. Die Anwendung der Methode erscheint jedoch zulässig, da die Grenzschichtdicken im betrachteten Reynoldszahlbereich sehr viel kleiner als die Krümmungsradien sind. Eine Ausnahme stellt der unmittelbare Heckbereich dar. Obwohl die Grundlagen dieses Integralverfahrens schon etwas älter sind, hat es sich zur Widerstandsrechnung bewährt.

Beim Originalverfahren wird der laminar-turbulente Übergang mit Hilfe eines empirischen, lokalen Umschlagskriteriums ermittelt. Dieses Kriterium wird derzeit noch bei der Formoptimierung eingesetzt, da es sehr recheneffizient ist. Tritt

vor dem Strömungsumschlag eine laminare Ablösung auf, so wird an der Ablösestelle auf turbulente Grenzschichtrechnung umgeschaltet. Die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes erfolgt nach der Formel von Young [17] aus den Grenzschichtdaten am Rumpfende. Der Zusatzwiderstand infolge laminarer Ablöseblasen wird nicht erfaßt.

Von mehreren Autoren wird auf die Unzulänglichkeiten der einfachen lokalen Kriterien bei der Umschlagsermittlung an Rotationskörpern hingewiesen. Insbesondere bei langgestreckten Körpern mit flachem Druckverlauf treten große Diskrepanzen zwischen verschiedenen Ansätzen auf. Dies resultiert aus dem Umstand, daß die Kriterien i. A. auf der Grundlage von Profilvermessungen bei verhältnismäßig kleinen Reynoldszahlen und großen Druckgradienten korreliert werden.

Eine zuverlässigere Umschlagsermittlung versprechen halbempirische Methoden basierend auf der linearen Stabilitätstheorie (e^n -Methoden). Zur Überprüfung optimierter Laminarkörper wurde daher im Nachrechenverfahren eine solche e^n -Methode implementiert. Bei dem verwendeten Verfahren wird die räumliche Anfachung zweidimensionaler Tollmien-Schlichting-Wellen durch Lösen der vollständigen Orr-Sommerfeld Differentialgleichung für verschiedene physikalische Frequenzen der Störwellen ermittelt. Es ist geplant diese aufwendige Methode künftig auch für die Formoptimierung von Laminarkörpern einzusetzen.

3.3 Optimierungsalgorithmus

Zur numerischen Formoptimierung von Rotationskörpern wurde das aerodynamische Berechnungsverfahren mit einem Optimierungsalgorithmus gekoppelt. Hierbei fand die Evolutionsstrategie nach Rechenberg [12] Verwendung, da sie gegenüber herkömmlichen Gradientenverfahren eine größere Chance zum Auffinden des globalen Optimums bezüglich einer Zielfunktion verspricht. Nachteilig ist die vergleichsweise hohe Anzahl der erforderlichen Optimierungsschritte.

In Anlehnung an den biologischen Evolutionsprozeß werden aus einer vorgegebenen Anzahl von Ausgangsquellenverteilungen (Eltern) durch Rekombination und zufälliger Mutation neue Quellverteilungen generiert. Die zugehörigen Rotationskörper werden anhand einer Zielfunktion bewertet. Diese Zielfunktion wird aus den berechneten Widerstandsbeiwerten für einen vorgegebenen Reynoldszahlbereich sowie einer Straffunktion beim Auftreten von Grenzschichtablösungen gebildet. Je nach Anwendungsfall kann dabei der volumenbezogene, der stirnflächenbezogene oder der auf die umspülte Oberfläche bezogene Widerstandsbeiwert minimiert werden. Für die Optimierung realer Luftschiffe soll die Zielfunktion künftig sukzessive ausgebaut werden, um beispielsweise den Widerstand von Leitwerken und Anbauten, sowie den Einfluß des Antriebes zu erfassen. Auch ist der Einfluß der aerodynamischen Kräfte auf Struktur- und Hüllenbelastung und somit auf das Gewicht des Luftschiffhumpfes zu beachten.

Die Evolutionsstrategie beinhaltet eine automatische Steuerung der Mutationsschrittweite, so daß eine zielgerichtete Optimierung ermöglicht wird. Weitere Informationen zum verwendeten Optimierungsalgorithmus finden sich in [15].

3.4 Ermittlung des Propellereinflusses

Es wurde ein Verfahren zur Berechnung des zeitlich gemittelten Einflusses eines Propellers auf die Umströmung von Rotationskörpern entwickelt [10]. Die Propellerscheibe wird bei dieser Methode durch eine flächenhafte radiale Zirkulationsverteilung modelliert, während eine diskrete Anzahl von Wirbelröhren variabler Stärke den Nachlauf repräsentieren. Die Ermittlung der Zirkulationsstärken basiert auf einer vorgegebenen Verteilung der gebundenen Zirkulation am Propellerblatt.

Die in der klassischen Propellertheorie getroffene Annahme eines nicht-kontrahierenden Nachlaufs ist bei größerer Schubbelastung des Propellers oder bei einer Beeinflussung des Propellerstrahls durch einen Verdrängungskörper nicht mehr zulässig. Vielmehr ist der Einfluß der selbstinduzierten und der vom Störkörper induzierten Geschwindigkeiten auf die Nachlaufgeometrie zu berücksichtigen. Durch die Berechnung der exakten induzierten Geschwindigkeiten auf den Wirbelflächen selbst wird beim verwendeten Verfahren die Bestimmung der Nachlaufgeometrie mittels Relaxation ermöglicht. Bei herkömmlichen Verfahren, die mit diskreten Wirbelfäden arbeiten, ist eine Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors auf der Singularität selbst nicht möglich. Zur Ermittlung von Propellerschub und -Leistung werden die Kräfte auf die gebundene Zirkulation der Propellerscheibe nach Kutta-Joukowski berechnet. Die theoretischen Grundlagen des Verfahrens sind ausführlich in [10] beschrieben.

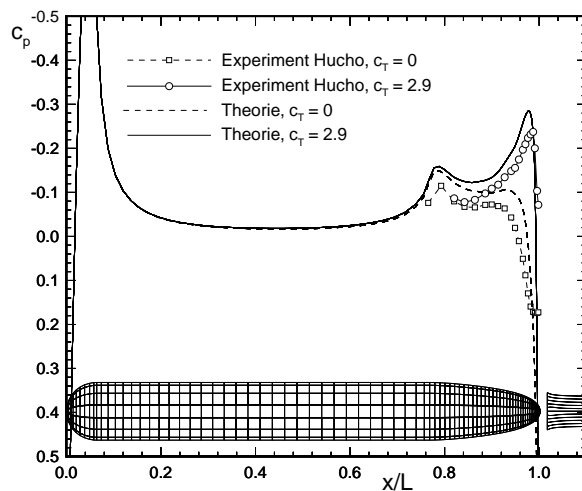


Abbildung 5. Druckverteilung an einem Rotationskörper unter Einfluß eines Heckpropellers ($d/R=0.417$)

Das Propellermodul wurde mit dem in den Abschnitten 3.1 und 3.2 beschriebenen Rumpfprogramm gekoppelt, um den Propellereinfluß auf einen stromauf liegenden Rotationskörper zu ermitteln. Zur Überprüfung des gekoppelten Rumpf-Propellerprogrammes wurden Vergleichsrechnungen zu experimentellen Untersuchungen von Hucho [8] durchgeführt. Die Versuche wurden in einem Windkanal bei einer Reynoldszahl von $Re_D = 5,4 \cdot 10^5$ (bezogen auf den Körperdurchmesser) durchgeführt. Die bei der Berechnung mit dem vorliegenden Verfahren benötigte Verteilung der gebundenen Zirkulation am Propellerblatt wurde aus einer experimentell ermittelten

Schubverteilung bestimmt. Dazu wurden die in [8] für verschiedene Fortschrittsgrade bei einem mittleren Einstellwinkel der Propellerblätter gegebenen Verteilungen gemittelt.

Abb. 5 zeigt die berechneten und die experimentell ermittelten Druckverteilungen für diesen Körper mit ($c_T=2.9$) und ohne ($c_T=0$) Propellereinfluß. Im gezeigten Beispiel betrug der Propellerabstand 41.7 % des Propellerradius. Zwischen den berechneten und den gemessenen Druckverteilungen zeigt sich eine auffällige Verschiebung, während die Verläufe gut übereinstimmen. Hierzu ist anzumerken, daß die Versuche in einem Windkanal mit offenem Meßquerschnitt durchgeführt wurden, wobei das Verhältnis zwischen dem Durchmesser des Windkanalstrahls und dem des Körpers kleiner als 3 war. Durch den Einfluß des Strahlrandes werden die am Modell gemessenen Drücke zu größeren Werten hin verschoben. Diese Tendenz zeigt sich in Abb. 5 im Vergleich zu den theoretischen Ergebnissen.

Während Propellerschub und propellerinduzierter Zusatzwiderstand mit dem vorliegenden Berechnungsverfahren recht zuverlässig ermittelt werden können, liefert die Bestimmung der erforderlichen Propellerleistung bei Heckmontage i. A. zu pessimistische Ergebnisse. Dies resultiert aus dem Umstand, daß bei der derzeitigen Implementierung der Einfluß der Viskosität im Rumpfnachlauf nicht berücksichtigt wird. Befindet sich der Propeller im Rumpfnachlauf, so ist die axiale Anströmgeschwindigkeit gegenüber dem reibungsfreien Fall reduziert, was die zur Erzeugung eines bestimmten Schubes erforderliche Leistung weiter verringert. Auf die bei der Schubberechnung relevante Umfangsgeschwindigkeit hat der Rumpfnachlauf jedoch direkt keinen Einfluß.

4 Berechnungsergebnisse und Diskussion

4.1 Formoptimierungen axial angeströmter Rotationskörper

Das in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 und in [15] vorgestellte Optimierungsverfahren wurde zur Minimierung des volumenbezogenen Widerstandsbeiwertes für verschiedene Reynoldszahlbereiche herangezogen. Der Einfluß des Antriebes auf die Rumpfumströmung blieb bei diesen Optimierungen unberücksichtigt.

Die gewählte Ausgangsquellverteilung entsprach einer ellipsoidähnlichen Startgeometrie mit einem Längen-Durchmesser Verhältnis von $L/D = 2.3$. Bei den vorgestellten Formoptimierungen wurden 20 Quellabschnitte verwendet. Da Sprungstellen an den Abschnittsgrenzen zugelassen waren entspricht dies einer Anzahl von 41 zu optimierenden Quellstärken. Die Optimierung erfolgte in mehreren Stufen, wobei nach jeder Stufe die Ergebnisse von parallel durchgeführten Optimierungen mit unterschiedlichem Schrittweitenfaktor zusammengeführt wurden.

Zunächst wurde ein Laminarkörper für mittlere Reynoldszahlen optimiert. Der Auslegungsbereich betrug dabei $Re_{V_j} = 2 \cdot 10^6$ bis $1 \cdot 10^7$, was dem Bereich kleiner unbemannter Luftschiffe entspricht. Der resultierende Körper (siehe Abb. 6) weist ein relativ kleines Längen-Durchmesser Verhältnis ($L/D = 3.51$) bei einem starken Druckabfall bis ca. 60 % der Körperlänge auf. Hierdurch wird im Auslegungsbereich theoretisch eine lange laminare Laufstrecke ermöglicht.

Wird bei der Nachrechnung dasselbe lokale Umschlagskriterium wie bei der Optimierung verwendet, ergibt sich ein sehr

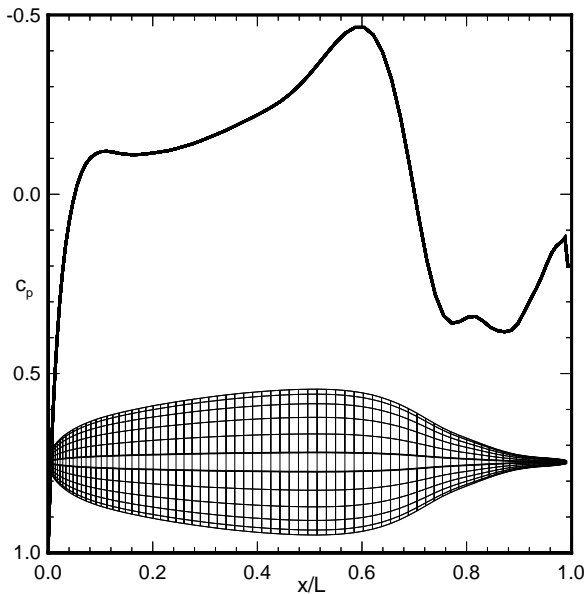


Abbildung 6. Potentialtheoretische Druckverteilung des optimierten Rotationskörpers I ($Re_{V_I} = 2 \cdot 10^6$ bis $1 \cdot 10^7$)

niedriger Widerstandsbeiwert für den gesamten Auslegungsbereich, mit einem scharfen Anstieg bei der oberen Reynoldszahl $Re_V = 10^7$ (Abb. 7). Es werden für den gesamten Auslegungsbereich keine Grenzschichtablösungen angezeigt.

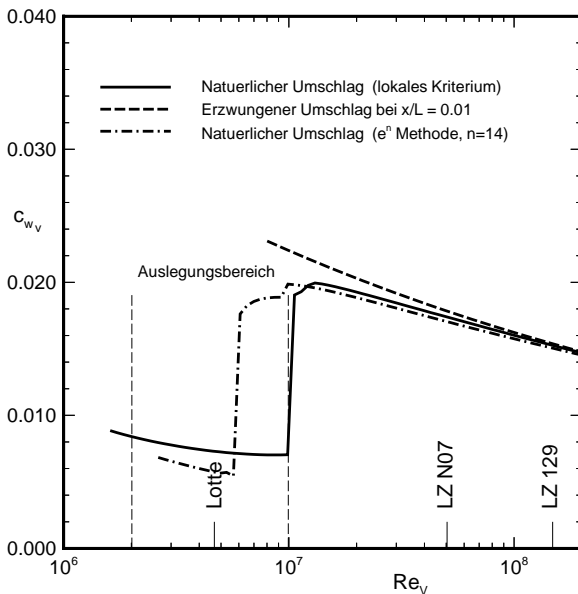


Abbildung 7. Widerstandsverlauf des optimierten Rotationskörpers I ($Re_{V_I} = 2 \cdot 10^6$ bis $1 \cdot 10^7$)

Die Nachrechnung unter Verwendung der e^n -Methode ergibt, daß das Vorspringen des Umschlages beim Körper I bereits für $Re_V \approx 5 \cdot 10^6$ zu erwarten ist ($n=14$). Für Reynoldszahlen unterhalb dieses Wertes zeigt das aufwendigere Berechnungsverfahren laminare Ablöseblasen an,

während das lokale Kriterium einen Grenzschichtumschlag vor der Ablösegrenze ermittelt. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Umschlagsermittlung mit Hilfe einfacher lokaler Kriterien ist bei künftigen Optimierungen von Laminarkörpern der Einsatz der e^n -Methode geplant.

Als weiteres Beispiel wurde eine Formoptimierung für den Bereich sehr großer, luftschiffrelevanter Reynoldszahlen ($Re_{V_{II}} = 1 \cdot 10^8$) durchgeführt. Obwohl nicht geklärt ist, inwieweit laminare Laufstrecken beim Auftreten von Konturunstetigkeiten und Hüllenflattern realer Luftschiffe erzielbar sind, wurde bei der Optimierung ein natürlicher Grenzschichtumschlag angenommen. Der resultierende Körper ist in Abb. 8 dargestellt. Die ungewöhnliche Kontur ($L/D = 4,26$) weist im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Laminarkörpern eine spitze Nase auf. Dies ist mit einem starken Druckabfall auf den vorderen 20 % verbunden, wodurch die Grenzschicht trotz der großen Reynoldszahl bis 15 % laminar gehalten werden kann (lokales Umschlagskriterium). Es ist jedoch anzunehmen, daß der Umschlagspunkt bei kleinen Anstell- oder Schiebewinkeln infolge größerer Saugspitzen schneller vorwandert als bei stumpfen Bugformen. Ähnliche spitznasige Konturen wurden bereits in Anlehnung an biologische Vorbilder von Hertel vorgeschlagen [5].

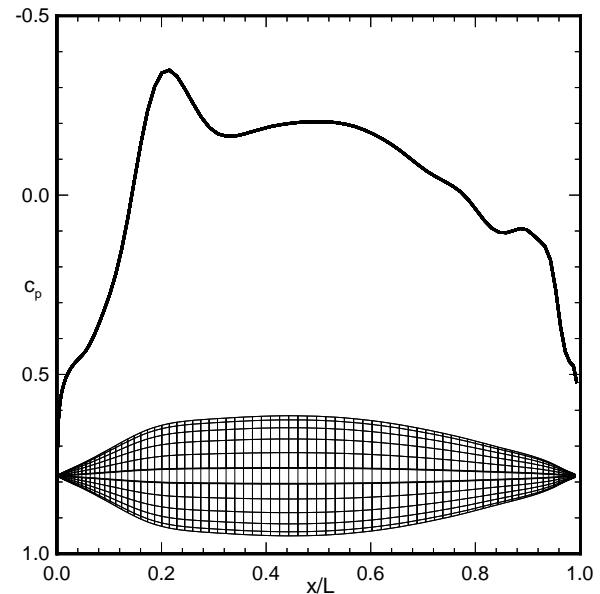


Abbildung 8. Potentialtheoretische Druckverteilung des optimierten Rotationskörpers II ($Re_{V_{II}} = 1 \cdot 10^8$)

Die Berechnung des Widerstandsverlaufes unter Verwendung des lokalen Umschlagskriteriums ergibt wiederum ein lokales Minimum bei der Auslegungs-Reynoldszahl (Abb. 9). Der Gewinn gegenüber der vollturbulenten Umströmung ist jedoch gering. Bei Verwendung der e^n -Methode zur Transitionsbestimmung tritt das Vorspringen des Umschlages, wie beim vorigen Optimierungsfall auch, bei kleineren Reynoldszahlen auf.

Interessant ist nun, ob mit dem optimierten Körper bei sehr großen Reynoldszahlen Widerstandsreduzierungen gegenüber bekannten Geometrien möglich sind. Dazu wurden Vergleichsrechnungen unter Verwendung des lokalen Um-

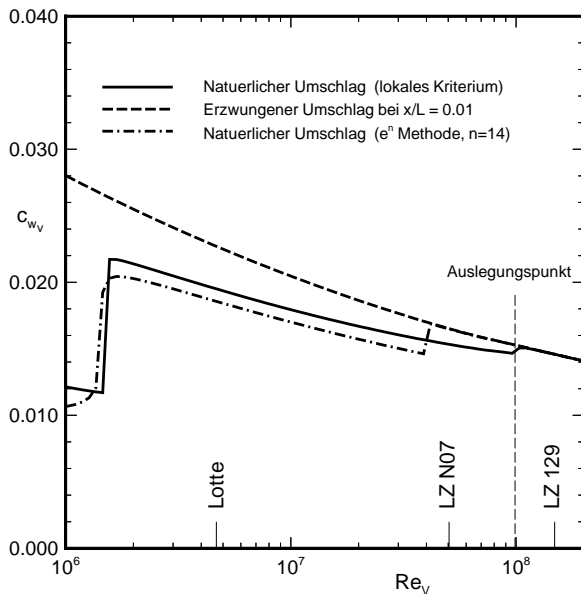


Abbildung 9. Widerstandsverlauf des optimierten Rotationskörpers II ($Re_{vII}=1 \cdot 10^8$)

schlagskriteriums bei der Auslegungs-Reynoldszahl des Körpers II durchgeführt. Die theoretischen Ergebnisse in Abb. 10 zeigen, daß gegenüber dem langgestreckten LZ 127 Rumpf eine Widerstandsreduktion von immerhin 10 % erzielt werden konnte. Im Vergleich zum besten Vergleichskörper (Gertler 4154) betrug der Gewinn dagegen lediglich 2 %. Dies bestätigt die eingangs getroffene Aussage, daß im Reynoldszahlbereich sehr großer Luftschiffe das Potential zur Widerstandsreduktion durch Formgebung eher gering ist. Bei kleineren Re-Zahlen sind jedoch erhebliche Verbesserungen, auch gegenüber bekannten Laminarkörpern, möglich.

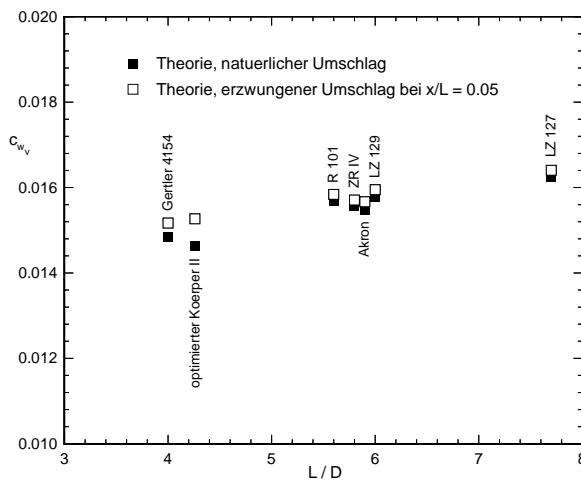


Abbildung 10. Theoretischer, volumenbezogener Widerstandsbeiwert verschiedener Rotationskörper für $Re_{vII}=1 \cdot 10^8$

4.2 Einfluß eines Heckpropellers auf Rumpfwiderstand und erforderliche Antriebsleistung

Die nachfolgenden Untersuchungen betreffen den Einfluß eines Heckpropellers auf die Umströmung von Luftschiffkörpern. In Abb. 11 sind zunächst Geometrie und potentialtheoretische Druckverteilung des LZ 129 Rumpfes ohne Anbauten und Leitwerke dargestellt (durchgezogene Linie, $c_T=0$). Die gestrichelte Linie zeigt die berechnete Druckverteilung unter dem Einfluß eines am Heck montierten Propellers mit einem Durchmesser, der ein Viertel des Körperdurchmessers beträgt. Entsprechend einer Fluggeschwindigkeit des Originals von 35 m/s wurde die auf die Rumpflänge bezogene Reynoldszahl zu $Re_L=570 \cdot 10^6$ festgelegt. Die Drehzahl des Propellers wurde solange iteriert, bis gerade soviel Schub resultierte, um den Widerstand auszugleichen und das Luftschiff stationär vorwärts zu bewegen. Der propellerinduzierte Zusatzwiderstand wird dabei berücksichtigt.

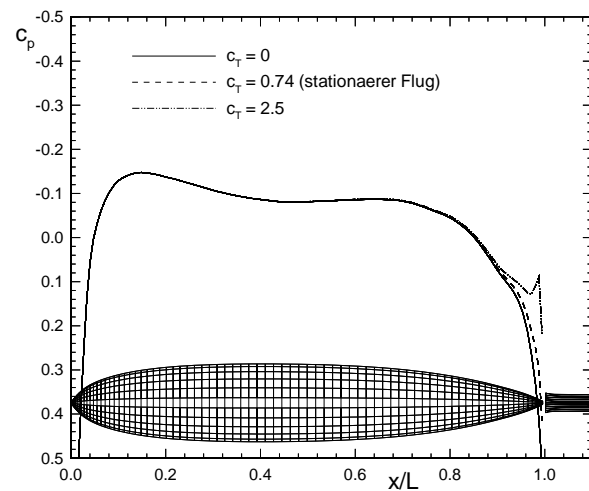


Abbildung 11. Druckverteilung LZ 129 Rumpf unter Einfluß eines Heckpropellers, $Re_L=570 \cdot 10^6$

Wie Abb. 11 zeigt, unterscheidet sich die resultierende Druckverteilung nur wenig von derjenigen bei abgeschaltetem Propeller. Diese geringe Differenz hat jedoch bereits einen merklichen Einfluß auf den Widerstand des Luftschiffkörpern.

Als Ergänzung ist noch die Druckverteilung bei einer fiktiven Schubbelastung von $c_T=2.5$ eingezeichnet, die sich im Heckbereich deutlich vom antriebslosen Fall unterscheidet. Für diesen Schubbeiwert ist auch die Geometrie des vollständig relaxierten Propellernachlaufs abgebildet.

Weitere Untersuchungen betreffen den Einfluß des Propellerabstandes auf den propellerinduzierten Zusatzwiderstand am Luftschiffkörper. Abb. 12 zeigt den für stationären Vorwärtsflug erforderlichen Schubbeiwert c_T in Abhängigkeit des Propellerabstandes d/R . Hierbei wurde die Propellerdrehzahl wieder solange iteriert, bis Kräftegleichgewicht zwischen erzeugtem Schub und Widerstandskraft am Körper herrschte. Der Schubbeiwert ist also proportional zum Gesamtwiderstandsbeiwert. Es zeigt sich, daß der Rumpfwiderstand bei einer Montage des Propellers am Heck ($d/R=0$) um gut 15%

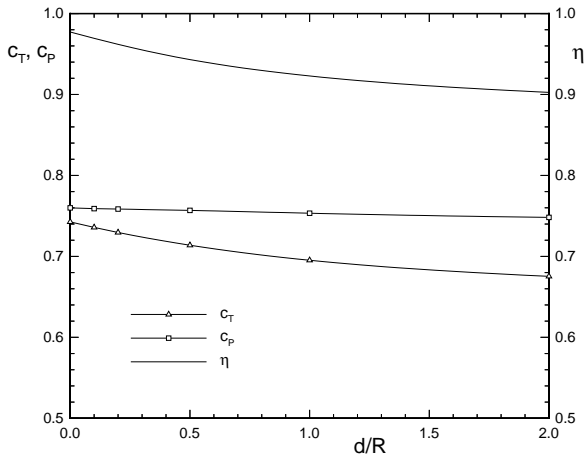


Abbildung 12. LZ 129: Schub- bzw. Leistungsbeiwert sowie Wirkungsgrad für einen Beispielpropeller bei Variation des Propellerabstandes, $Re_L = 570 \cdot 10^6$

gegenüber unendlichem Abstand vergrößert ist. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Antriebswirkungsgrad η , da der Propeller – auch im reibungsfreien Fall – in einem Gebiet reduzierter axialer Anströmgeschwindigkeit arbeitet.

In Abb. 12 ist der mit dem vorgestellten Verfahren berechnete Leistungsbeiwert c_p in Abhängigkeit des Propellerabstandes aufgetragen. Obwohl der Rumpfwiderstand bei kleinem Propellerabstand merklich zunimmt bleibt die erforderliche Propellerleistung nahezu unverändert. Dies resultiert aus dem gesteigerten Antriebswirkungsgrad infolge der reduzierten reibungsfreien Anströmgeschwindigkeit des Propellers.

Aus den Berechnungsergebnissen kann gefolgert werden, daß sich bei Berücksichtigung der Viskosität im Nachlauf der Leistungsbedarf bei Heckmontage gegenüber herkömmlicher Propellerinstallation verringert. Der Vorteil ist dabei umso größer, je dicker die Rumpfgrenzschicht, d.h. je kleiner die Reynoldszahl ist. Man sollte daher vorsichtig bei der Interpretation von Windkanalversuchen im Modellmaßstab sein, die normalerweise bei sehr viel kleineren als den Original-Re-Zahlen durchgeführt werden.

Neben der Grenzschichtdicke ist für den Wirkungsgrad eines Heckpropellers auch die Gestalt des Rumpfeckes von entscheidender Bedeutung. Je stumpfer der Körper, desto kleiner ist die Axialkomponente des reibungsfreien Geschwindigkeitsfeldes am Ort des Propellers. Entsprechend steigt der Wirkungsgrad. Auf der anderen Seite erhöht sich bei einem stumpfen Rumpfeck der Widerstand durch den Einfluß des Heckpropellers stärker. Berechnungen zeigen, daß sich – bei Vernachlässigung der Reibungseinflüsse im Rumpfnachlauf – wiederum keine Verbesserung bezüglich der erforderlichen Antriebsleistung ergeben.

Bei der Bewertung des Propellerwirkungsgrades muß weiter beachtet werden, daß diese, neben den genannten Faktoren, stark von der Auslegung des Propellers, insbesondere von der Zirkulationsverteilung und dem Fortschrittsgrad ($\lambda = U_\infty / \omega R$) abhängen.

Es bleibt festzuhalten, daß mit dem hier verwendeten Verfahren bezüglich der Berechnung des Propellerwirkungsgra-

des und der erforderlichen Antriebsleistung derzeit nur der Grenzfall $Re \rightarrow \infty$ untersucht werden kann. Der Reibungswiderstand des Rumpfes wird bei anliegenden Grenzschichten jedoch für alle Re-Zahlen zuverlässig ermittelt. Eine Verfahrenserweiterung zur Berechnung des viskosen Rumpfnachlaufs ist geplant. Die Reduktion der erforderlichen Antriebsleistung durch den Heckpropeller kann dann quantifiziert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Verfahren zur Optimierung und Nachrechnung von axial angeströmten Rotationskörpern in inkompressibler Strömung entwickelt und vorgestellt. Diese Methoden dienen zum Entwurf widerstandsminimierter Körper für verschiedene Reynoldszahlbereiche. Die für mittlere Re -Zahlen ($Re_V \lesssim 10^7$) optimierten Körper weisen lange laminare Laufstrecken und einen sehr niedrigen Widerstandsbeiwert auf. Bei der Optimierung von Laminarkörpern stellt die Umschlagsermittlung den größten Unsicherheitsfaktor dar. Zur Durchführung künftiger Formoptimierungen ist daher geplant, eine aufwendige e^n -Methode zu implementieren.

Bei sehr großen, luftschiffrelevanten Reynoldszahlen mit nahezu vollturbulenter Rumpfumströmung zeigt sich, daß der Volumenwiderstand nur sehr unwesentlich von der Kontur abhängt. Die möglichen Gewinne durch reine Formgebung sind somit eher gering.

Als weitere Möglichkeit zur Reduzierung der erforderlichen Antriebsleistung wurde daher die Verwendung eines Heckpropellers untersucht. Hierzu wurde eine Methode zur Berechnung des zeitlich gemittelten Propellereinflusses auf die Rumpfumströmung entwickelt. Beispielrechnungen an Luftschiffkörpern mit Heckpropellern bestätigen, daß unter Einfluß des Propellers der Rumpfwiderstand ansteigt. Andererseits sinkt die zur Erzeugung eines bestimmten Schubes notwendige Antriebsleistung mit abnehmendem Propellerabstand. Legt man das reibungsfreie Geschwindigkeitsfeld zugrunde ändert sich die erforderliche Antriebsleistung bei Variation des Propellerabstandes kaum. Es kann daraus geschlossen werden, daß bei Berücksichtigung der Viskosität im Rumpfnachlauf der Heckpropeller, insbesondere bei kleinen Reynoldszahlen, Vorteile bringt. Zur Quantifizierung dieses Vorteils ist eine Verfahrenserweiterung geplant.

LITERATUR

- [1] J. J. Cornish; D. W. Boatwright: *Application of Full Scale Boundary-Layer Measurements to Drag Reduction of Airships*. Aerophysics Department, Mississippi State University, Research Report No. 28 (1960).
- [2] R. Eppler; D. M. Somers: *A Computer Program for the Design and Analysis of Low-Speed Airfoils*. NASA TM 80210 (1980).
- [3] Fabio R. Goldschmied: *Wind Tunnel Demonstration of an Optimized LTA System with 65 % Power Reduction and Neutral Static Stability*. AIAA 83-1981 (1983).
- [4] R. J. Hansen; J. G. Hoyt: *Laminar-To-Turbulent Transition on a Body of Revolution with an Extended Favorable Pressure Gradient Forebody*. Journal of Fluids Engineering, Vol. 106, June 1984, pp 202–210 (1984).
- [5] Heinrich Hertel: *Full Integration of VTOL Power Plants in the Aircraft Fuselage*. AGARD CP No. 9, Part I, pp 65–96 (1966).

- [6] John L. Hess; R. M. James: *On the Problem of Shaping an Axisymmetric Body to Obtain Low Drag at Large Reynolds Numbers*. Douglas Aircraft Company, Long Beach, CA, Report MDC J6791, January 1975.
- [7] S. F. Hoerner: *Fluid-Dynamic Drag*. Published by the Author (1965).
- [8] W.-H. Hucho: *Untersuchungen über den Einfluß einer Heckschraube auf die Druckverteilung und die Grenzschicht schiffsähnlicher Körper*. Dissertation Technische Hochschule Braunschweig, Fakultät für Maschinenwesen (1967).
- [9] Th. Lutz; H. Schweyher; S. Wagner; R. Bannasch: *Shape Optimization of Axisymmetric Bodies in Incompressible Flow*. 2nd International Airship Conference, Stuttgart/Friedrichshafen, 3–4 July 1996.
- [10] Th. Lutz; D. Leinhos; S. Wagner: *Theoretical Investigations of the Flowfield of Airships with a Stern Propeller*. International Airship Convention and Exhibition, Bedford, Great Britain, 5–7 July 1996 (to be published).
- [11] William Edward Pinebrook: *Drag Minimization on a Body of Revolution*. Dissertation at the Faculty of the Department of Mechanical Engineering of the University of Houston (1982).
- [12] I. Rechenberg: *Evolutionsstrategie '94*. Fromman-Holzboog, Stuttgart Bad-Cannstatt, ISBN 3-7728-1642-8 (1994).
- [13] U. Rüger: *Untersuchungen zum Potential von Widerstandsreduzierungen bei Luftschiffkörpern*. Diplomarbeit am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, April 1995.
- [14] U. Rüger; B. Kröplin: *Airship Drag Reduction – Optimization Aim and Evaluation Method*. 2nd International Airship Conference, Stuttgart/Friedrichshafen, 3–4 July 1996.
- [15] H. Schweyher; Th. Lutz; S. Wagner: *An Optimization Tool for Axisymmetric Bodies of Minimum Drag*. 2nd International Airship Conference, Stuttgart/Friedrichshafen, 3–4 July 1996.
- [16] E. Truckenbrodt: *A Method of Quadrature for Calculation of the Laminar and Turbulent Boundary Layer in Case of Plane and Rotationally Symmetrical Flow*. NACA TM 1379 (1955)
- [17] A. D. Young: *The Calculation of Total and Skin Friction Drags of Bodies of Revolution at Zero Incidence*. ARC R&M No. 1874 (1939)