

**Michael Dienst**

**Reihenuntersuchung zu Profilkonturen für  
Leit- und Steuerflächen von Seefahrzeugen:  
Datenreihe ERpL2050**

**Wissenschaftlicher Aufsatz**

# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

### **Impressum:**

Copyright © 2013 GRIN Verlag  
ISBN: 9783656472063

### **Dieses Buch bei GRIN:**

<https://www.grin.com/document/230741>

**Michael Dienst**

**Reihenuntersuchung zu Profilkonturen für Leit- und Steuerflächen von Seefahrzeugen: Datenreihe ERpL2050**

## **GRIN - Your knowledge has value**

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite [www.grin.com](http://www.grin.com) ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

### **Besuchen Sie uns im Internet:**

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

[http://www.twitter.com/grin\\_com](http://www.twitter.com/grin_com)

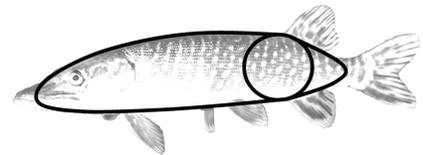
# Reihenuntersuchung zu Profilkonturen für Leit- und Steuerflächen von Seefahrzeugen

## Datenreihe ERpL2050

**Intro.** In einer Analysekampagne werden Konturen synthetischer Profile auf ihre Eignung hin untersucht, als Profilform für Leit- und Steuerflächen kleiner Seefahrzeuge eingesetzt zu werden.

Das symmetrische Profil ERpL[p1][p2] (ERpL für **E**lliptic **R**igid **p**er **L**ength) mit den beiden beschreibenden Parametern "spezifische Profildicke  $p1=d/t[\%]$  und Wölbungsrücklage  $p2=xf/t [\%]$ " wurde als eine vollständig synthetisierte Tragflügelsektion entwickelt und im Frühjahr 2013 vom deutschen Patentamt DPMA veröffentlicht<sup>1</sup>. Dem Aufsatz ist die technische Beschreibung im Anhang beigelegt. Der Entwicklung des synthetischen Profils ERpL gingen Beobachtungen und erste Untersuchungen biologischer Schwimmer zu Grunde, die für Anbauten Leit- und Steuerflächen kleiner Seefahrzeuge relevanten Reynoldszahlenbereich erstaunliche Leistungen vollbringen.

Der Hecht (*Esox lucius*) ist ein aggressiver Raubfisch und in den (Süßwasser-) Gewässern der nördlichen Hemisphäre verbreitet. Die durchschnittliche Körperlänge liegt im Bereich von  $\{0,5 < L[m] < 1,5\}$ .



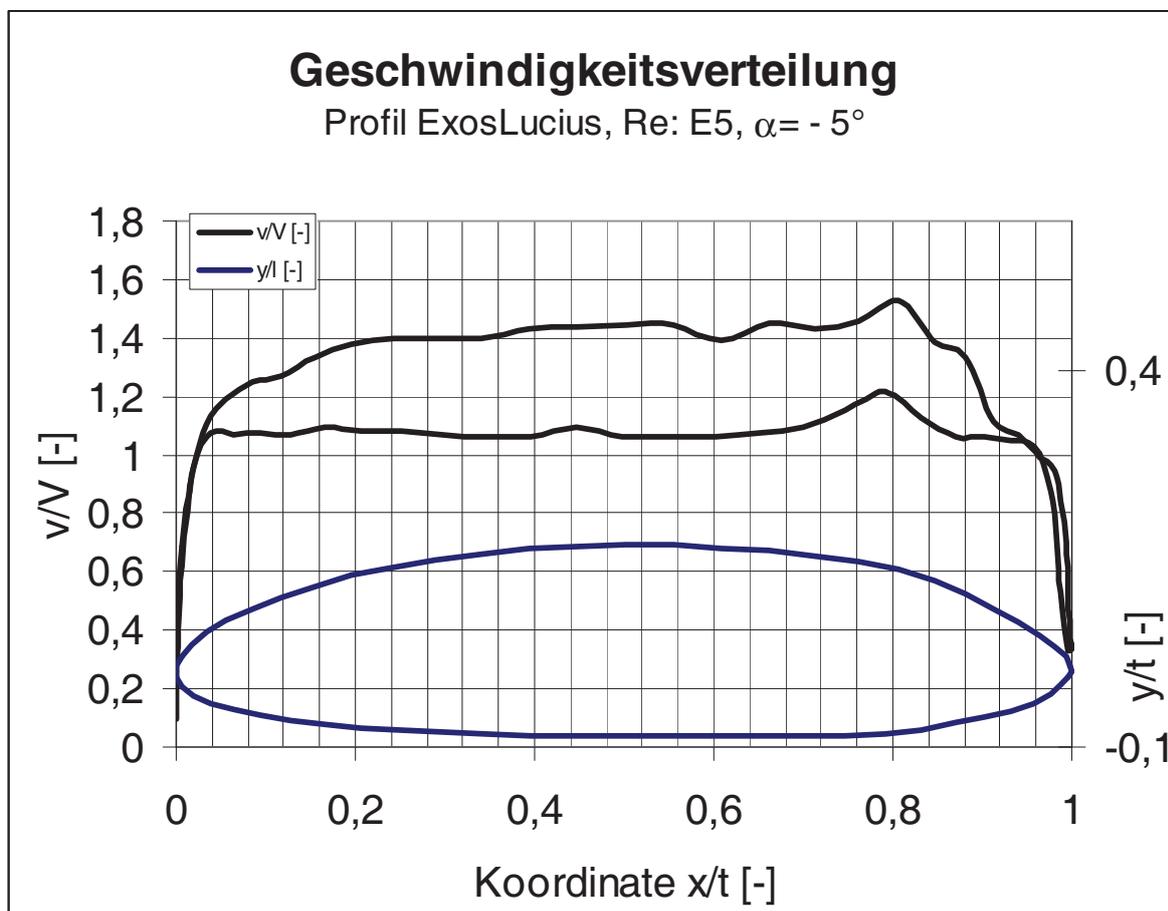
Seine Körperform ist eigentümlich. Die Seitenansicht des Fisches erteilt dem Betrachter eine Lehrstunde in Laminarkörperkonstruktion. Man kann nur beeindruckt sein von dieser kompromisslosen und hinsichtlich der Widerstandsarmut dieser schnellen Jäger konsequenten Gestaltgebung. Legt man - in einem ersten Hub qualitativer Betrachtungen - mit einem Kurvenlineal eine Hüllkontur an die Fischsilhouette an, so erscheint ein hübsches, wenn auch vielleicht ein wenig moppeliges Laminarprofil. Und: einer potentialtheoretischen Untersuchung hält diese Profilkontur durchaus stand. Bei auftriebsfreier Anströmung (das entspricht einem Anstellwinkel von  $\alpha = -5 [^\circ]$  bezogen auf die aus der Hechtkontur extrahierte Form) und einer Geschwindigkeit  $Re:100000$  besitzt die Profilkontur den beachtlichen Widerstandsbeiwert  $C_w = 0,0023$ . Das Bild

<sup>1</sup> Fluiddynamisch wirksames Strömungsprofil aus geometrischen Grundfiguren.  
(GM301) DE 20 2013 004 881.6 IPC: F03D 1/06

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

der Geschwindigkeitsverteilung zeigt einen sehr ausgeglichenen Verlauf. Die Geschwindigkeitsverteilung  $v/V$  gilt als ein aussagestarkes quantitatives Gütekriterium bei der ersten Beurteilung neuartiger oder bislang unbeschriebener Profilkonturen.

Die anfängliche Absicht, ein möglichst allereinfachstes parametrisches Modell des Hechkörpers zu entwerfen, legte die Entwicklung einer aus bekannten Grundformen zusammengesetzten Profilgeometrie nahe. Eine nur mit den beiden Parametern Profildicke und Wölbungsrücklage gekennzeichnete Kontur ist in diesem Zusammenhang und darüber hinaus hilfreich und außerordentlich sympathisch. Die "marktüblichen" Laminarprofile besitzen dagegen eine eher aufwändige Deklaration und sind einer Parametrisierung, wie sie beispielsweise in Optimierungsstrategien gefordert wird, nicht unmittelbar zugänglich. Hierüber wird an anderer Stelle noch die Rede sein. Kommen wir zum Schluss noch einmal auf den Hecht Esox Lucius und seine Laminarkörperform zurück. Kandidaten der ERpL-Profilserie mit Längenparametern  $\{50 < p_2[pph] < 80\}$  bilden derartige Konturen ab.

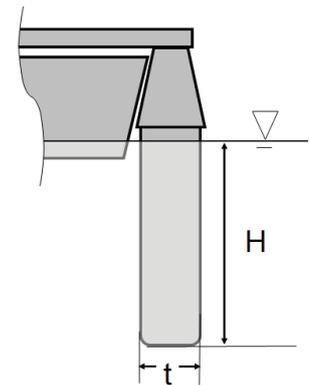


## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

**Leit- und Steuerflächen.** In Fahrt und insbesondere beim Manövrieren von kleinen Jollen bis hin zu Rennsegelyachten ist neben der hohen mechanischen Belastung der strömungsmechanisch wirksamen Bauteile im Bereich des Unterwasserschiffes die optimale und an Strömungswiderständen arme Funktionsweise entscheidend für höchste Fahrleistungen. Grundsätzlich sind bei der Konstruktion von leistungsoptimierten Segelfahrzeuge und all ihren Bauteilen Robustheit, Formhaltigkeit, Funktion und Lebensdauer bei geringem Gewicht von Bedeutung. Zu den fluidmechanisch wirksamen Leitflächen im Unterwasserbereich von Rennsegelyachten gehören die Ruderanlage, bzw. die Ruderblattfläche.

In Fahrt bildet eine profilierte Ruderblattfläche dann einen fluiddynamisch wirksamen Tragflügel aus, wenn eine nicht zentrische Anströmung durch das Fluid herrscht. Die aus dem hydrodynamischen Auftriebsgebaren der Ruderblattfläche resultierende Querkraft wird beim Manövrieren genutzt. Die Verhältnisse beim Manövrieren in Wasser sind denen, die an einer aerodynamisch wirksamen Rudertagfläche an Luftfahrzeugen herrschen, physikalisch ähnlich.

Ruder von Rennsegeljollen sind üblicherweise aus symmetrisch profiliertem Vollmaterial und sind starr. Für die Kontur des vom Schiffskörper abweisenden Schwert- bzw. Ruderblattflächenendes sind unterschiedliche Formen bekannt. Optimierte Ruderanlagen sind besonders bei Rennsegelyachten gebräuchlich.



### Annahmen hinsichtlich der zu untersuchenden Segeljollen.

Hier ist von Interesse, welche Ruderblattgeometrie den Untersuchungen zu Grunde liegt, und in welchem Geschwindigkeitsbereich die Jollen und damit die Rudertragflächen betrieben werden. Gegenstand der Untersuchung sind Ruderanlagen von der Größenordnung der

- Laserjolle (Wasserlinienlänge:  $L_{\text{Laser}} = 4.20$  [m]) und der
- 20er Rennjolle (Wasserlinienlänge:  $L_{20\text{er}} = 9.0$  [m]).

Damit variieren die Tiefen der Ruderblattprofile  $t$  und die Eintauchhöhe des Ruderblattes in den Größenbereichen:

Tiefe des Ruderprofils:  $0.1$  [m]  $< t < 0.3$  [m],  
Eintauchhöhe des Blattes:  $0.8$  [m]  $< H < 1.0$  [m],

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Die Abschätzung eines realistischen Bereichs der zu Grunde liegenden Reynoldszahlen führt über die theoretische Rumpfgeschwindigkeit eines sich in Verdrängerfahrt befindenden Schiffes, bzw. die

Wellenausbreitungs-

geschwindigkeit:  $c^2 [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]^2 = g [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \cdot \lambda [\text{m}] / 2 \Pi \quad (1)$

Die Wasserlinienlänge des Schiffes determiniert die Wellenlänge  $\lambda / 2\Pi$ , so dass für das schnellere der beiden Schiffe gilt:

$$c_{20\text{er}}^2 [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]^2 = 9.81 [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \cdot L_{20\text{er/Wasserlinie}} [\text{m}] = (9.4)^2 [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]^2$$

Ein Schiff in Fahrt verursacht aufgrund seines gegebenen Volumens und Gewichts eine Verdrängung des Fluids und damit eine Ausweichströmung um den Störkörper“ herum. In Fahrt herrscht nun eine nichthomogene Druckverteilung entlang der Schiffskontur (des Wasserpasses). Eine Druckminderung verursacht ein Wellental an der Störkörperkontur, eine Druckerhöhung entsprechend einen Wellenberg. Das von einem Schiff generierte Wellensystem besteht aus zwei überlagerten Komponenten, (1) den leicht gekrümmten Diagonalwellen, die unabhängig von der Geschwindigkeit unter einem Winkel von je  $20^\circ$  zur Fahrtrichtung auftreten und (2) den Querwellen rechtwinklig zum Kurs. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Welle ist bei genügend großen Wassertiefen eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ . Die entscheidende Wellenlänge ist bei Schiffen die Lücke zwischen Bug und Heck, also die Wasserlinienlänge  $L = \lambda / 2\pi$ . Die Froude-Zahl ist das Verhältnis der Geschwindigkeit des Schiffes  $v$  zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des von diesem erzeugten Wellensystems. Die maximale theoretische Rumpfgeschwindigkeit eines Schiffes in Verdrängerfahrt ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.

Die kritische Froude-Zahl von  $Fr_{\text{krit}} = 0.35$  soll den Geschwindigkeitsbereich, ausgedrückt über die Reynolds-Zahl, nach oben hin abgrenzen. Aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass für Froude-Zahlen  $> Fr_{\text{krit}}$  der Wellenwiderstand den Hauptanteil des Gesamtwiderstands des in Verdrängerfahrt bewegten Schiffes ausmacht und dieser exorbitant anwächst.

Für eine erste Untersuchung der Ruderblattprofile einer Segeljolle soll die maximale theoretische Rumpfgeschwindigkeit den oberen Geschwindigkeitsbereich markieren. Für Strömungsuntersuchungen ist es überdies Vorteilhaft, lokale Geschwindigkeiten des Fluids über die betreffende Reynoldszahl auszudrücken.

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

$$\text{Froude-Zahl} \quad Fr^2 = v^2 / c^2 \quad [-] \quad (2)$$

$$\text{Reynolds-Zahl} \quad Re = v \cdot L / \nu \quad [-] \quad (3)$$

Damit folgt für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich der 20er Rennjolle ein maximaler Wert von:

$$v_{\max} = Fr_{\text{krit}} \cdot c_{,20er} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] = 3.29 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}].$$

Das Strömungsgebaren beim Manövrieren kleiner Schiffe ist reichlich komplex und bedarf eigener, gesonderter Untersuchungen. Den Wert für die untere Schranke des Geschwindigkeitsbereichs legen wir deshalb eigenständig fest. Die zu untersuchenden Bootsgeschwindigkeiten sollen bei unseren Betrachtungen nicht kleiner als  $v_{\min} = 0.5 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  sein.

Die Tiefe  $t$  des Ruderprofils repräsentiert die signifikante Länge  $L$  in der Formulierung der Reynolds-Zahl und variiert im Bereich von

$$\text{Profiltiefe: } [0.1 [\text{m}] < t < 0.3 [\text{m}]];$$

die kinematische Viskosität<sup>2</sup> des Mediums ist mit  $\nu(\text{Wasser}) = 0,1012 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$  als Tabellenwert gegeben. Damit sind die minimalen und die maximalen errechneten Reynoldszahlen angegeben mit den Zahlenwerten:

$$Re_{\text{unten}} = 49.407 \text{ und } Re_{\text{oben}} = 975.296;$$

sie determinieren den Untersuchungsbereich mit den relevanten Geschwindigkeiten:

$$\text{Geschwindigkeitsbereich: } 5 \cdot 10^4 < Re < 1 \cdot 10^6$$

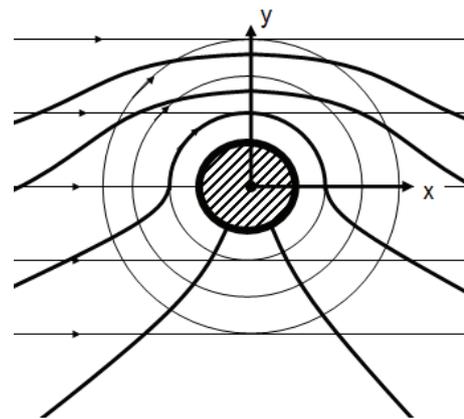
Ziel dieser Reihenuntersuchung ist keineswegs die Ausgestaltung einer Ruderanlage für die exemplarisch genannten Bootstypen. Vielmehr sollen Tragflächenprofile in einem typischen Einsatzbereich hinsichtlich Auftriebs- und Widerstandsgebaren beim Manövrieren miteinander vergleichbar werden. Ziel der Untersuchung ist die Abschätzung der grundsätzlichen physikalischen Wirksamkeit jener Profilgeometrien, für die bislang keine Tabellenwerke oder Untersuchungsergebnisse Anderer zur Verfügung stehen.

## Validierung und Analyse

Als **Profil** bezeichnet man in der Strömungslehre die Form des Querschnitts eines Körpers in Strömungsrichtung. Durch die spezifische Form und die Umströmung durch eine Flüssigkeit oder ein Gas entstehen an diesen Körpern angreifende Kräfte.

Speziell geformte Profile eignen sich besonders für die Erzeugung von dynamischem Auftrieb bei geringem Strömungswiderstand. Beispiele dafür sind das Profil von Vogelflügeln, von Tragflächen an Flugzeugen, Propeller von Schiffen oder Turbinenschaufeln. Da die Form des Profils großen Einfluss auf die Funktion hat, ist die Entwicklung und Charakterisierung von Profilen ein wichtiges Teilgebiet der Aerodynamik. (aus Wikipedia)

Der Satz von KUTTA-JOUKOWSKY besagt: Wird eine ideale Parallelströmung mit einer ebenfalls idealen Zirkulation überlagert, wirkt auf einen Strömungskörper eine Kraft, die senkrecht zur Anströmrichtung gerichtet ist. Die Skizze zeigt eine Kreisumströmung (schematisch) als Superposition von Translations- und Zirkulationsströmung.



Resultierende Querkraft in positiver y-Richtung. In Strömungsrichtung hingegen wird keine Kraft auf den Körper ausgeübt. Die Querkraft wirkt dabei in die Richtung, in der die beiden Strömungskomponenten gleichgerichtet verlaufen. Ein ideales Fluid kann somit auf einen Körper keinen Widerstand, wohl aber eine Querkraft ausüben. Dies steht jedoch in einem Widerspruch zu den praktischen Erfahrungen in der Strömungsmechanik. Realfluide üben sehr wohl einen Widerstand an einem durch sie bewegten Strömungskörper aus (Lagrange'sche Sichtweise) bzw. verursachen eine Kraft in Richtung der Strömungshaupttrichtung, entgegengesetzt der Anströmrichtung (Eulersche Sichtweise). Durch ein entsprechendes Design des Strömungskörpers, seiner Körperkontur (Schnitte) und seiner Ausrichtung bezüglich der Anströmung kann erreicht werden, dass die (Summe aller) Strömungswiderstände klein im Vergleich zu den der Strömung vertikalgerichteten Querkraften wird. Diese Querkraft resultiert in erster Linie aus den dynamischen Auftriebskräften am Strömungskörper. Nachfolgend sollen derartige Auftrieb (bzw. Querkraft) generierende Strömungskörper Krafttragflächen oder Arbeitstragflächen bzw. einfach Tragflügel genannt werden.

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Das Strömungsprofil bezeichnet die Form eines Strömungskörpers als eine Schnittdarstellung in Strömungsrichtung des umgebenden Fluids. Die Kontur eines Strömungsprofils bezeichnet die umhüllende Gestalt des Strömungskörpers. Besonders konturiert sind Strömungsprofile für Krafttragflächen und Arbeitstragflächen. Durch die spezifische Form von Kraft- und Arbeitstragflächen und durch die Umströmung des Fluids kommt es zu einem Wechselwirkungsgeschehen, das durch Energieaustausch gekennzeichnet ist.

Krafttragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die geeignet sind, dem bewegten umgebendem Fluid vornehmlich Energie zu entziehen. Beispiele sind die Repellertragflächen einer Windkraftanlage oder die Schaufeln einer Fließwasserkraftanlage.

Arbeitstragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die vornehmlich Energie in ein umgebendes Fluid einkoppeln. Beispiele sind die Leit- und Steuerflächen von Luft- und Seefahrzeugen, das Paddel eines Kanus oder Schaufeln von fluidmechanischen Antrieben.

Für Kraft- und Arbeitstragflächen wird in der Regel eine mechanisch starrer Form, ein deklaratorisch definiertes Profile und eine nichtflexible Kontur angestrebt. Die Profile von Kraft- und Arbeitstragflächen sind in der Regel entweder definiert symmetrisch oder definiert asymmetrisch.

Bei einfachen geometrischen Formen, etwa den Konturen von ebenen Plattenprofilen, bei Wölbplattenprofilen oder bei einfach gekröpften Knickplattenprofilen ist der Deklarationsaufwand gering. Eine geschlossene mathematische Beschreibung in Gestalt einfacher Formeln existiert. Bei manchen Profilformen und vor dem Hintergrund hoher Präzisionsansprüche an das Konstruieren, das Fertigen von Kraft- und Arbeitstragflächen und für das Messen oder die mathematische Handhabung von Konturen von Profilen von Kraft- und Arbeitstragflächen ist der Deklarationsaufwand, der auch die mathematischen Interpolationsmodelle betrifft, teilweise erheblich. Es ist üblich, Koordinaten der Konturen von Strömungsprofilen sowie die zugehörigen mathematischen Handhabungsmethoden in Datenbanken zu hegen (siehe auch: The Airfoil Investigation Database, [W-2] und UIUC Airfoil Coordinates Database [W-3]).

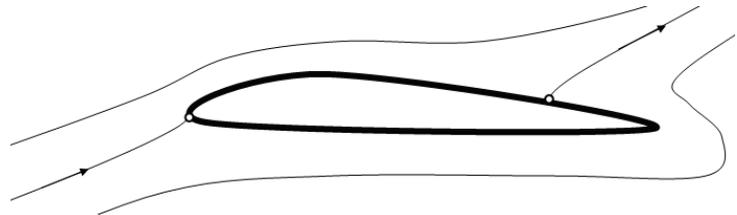
### Geometrische Kriterien

In der Diskussion um Tragflügelprofile tauchen einige Geometriegrößen bezeichnende Begriffe auf: Die **Profiltiefe** ( $t=1$ ) bezeichnet die längste Linie von der Profilnase bis zur Profilhinterkante (Profilsehne). Die **Skelettlinie** ist die (Zentral-) Konstruktionslinie eines Profils. Auf der Skelettlinie aufgereichte Kreise könnten in ihren Loten das Profil generieren. Die **Profilwölbung** ( $f/t$ ) bezeichnet die größte Abweichung der Skelettlinie von der Profilsehne. Die **Wölbungsrücklage** ( $xf/t$ ) der

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Profilkontur bezeichnet den Abstand von der Profilnase, den der Punkt in maximaler Höhe der Skelettlinie hat. Die **Profildicke** ( $d/t$ ) ist der größtmögliche Kreisdurchmesser auf der Skelettlinie und die **Dickenrücklage** ( $xd/t$ ) bezeichnet den Abstand der größten Dicke über der Profilsehne von der Profilnase. Die Profilnase begrenzt die Profilkontur bugwärtig (Lead-In-Kontur), die Hinterkante begrenzt die Profilkontur heckwärtig (lead-Out-Kontur). Der **Nasenradius** ( $r/t$ ) bezeichnet den Radius des Nasenkreises am Profilbug und der **Hinterkantenwinkel** ( $\tau$ ) ist der Winkel an der Hinterkante zwischen Profiloberseite und Profilunterseite der Profilkontur.

**Querkrafterzeugung.** Der räumliche dreidimensionale Tragflügel muss durch eine unsymmetrische Umströmung die zur



Entstehung der Querkraft notwendige Zirkulation selbst erzeugen. Analog zur Kreisumströmung entsteht bei Tragflügelprofilen die dynamische Querkraft (Auftrieb) nur dann, wenn eine gleich große vertikale Impulsänderung erfolgt. Diese Impulsänderung wird erreicht, indem die Tragfläche (das Tragflächenprofil) Fluid (nach unten) ablenkt. Es ist üblich, den Strömungszustand um ein Strömungsbauteil über die Reynolds-Similarität zu beschreiben<sup>3</sup>.

Als "klein" sollen Anströmgeschwindigkeiten und/oder geometrische Bauteilabmessungen gelten, die einen Bereich von Reynolds-Zahlen  $\{Re < 5000\}$  determinieren. Gestaltungsstrategien zur Strömungskontrolle entlang der Kontur eines Profils in einem Bereich kleiner Reynolds-Zahlen können den Ort des Umschlagpunktes von laminarer in turbulente Strömung betreffen.

Das Tragflügelprofil muss so gestaltet und entsprechend "angestellt" sein, dass es aus der Anströmsituation eine für die Querkrafterzeugung notwendige Zirkulation erzeugen kann. In einer potentialtheoretischen Betrachtung werden zunächst zwei "Staupunkte identifiziert. Eine scharfe Profilhinterkante bewirkt, dass das <Tragflügelprofil von unten herkommend nach oben bis zum hinteren, auf der Profiloberseite

<sup>3</sup> Reynolds-Zahl  $Re = v \cdot L / \nu$  [-]

### Stoffgrößen einiger Strömungsmedien

Stoff	dyn. Viskosität $\eta$	Dichte $\rho$	kin. Viskosität $\nu$	Schallgeschw. $a$
[phys. Einheit]	[ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	[ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Luft <sub>1</sub>	$18,1 \cdot 10^{-6}$	1,188	$15,24 \cdot 10^{-6}$	343
Wasser <sub>2</sub>	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$0,998 \cdot 10^3$	$0,1012 \cdot 10^{-6}$	1484
Öl <sub>3</sub>	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$0,858 \cdot 10^3$	$7,93 \cdot 10^{-6}$	1340

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

liegenden Staupunkt umströmt werden muss. Diese Umströmung einer scharfen Hinterkante führt (theoretisch) zu einer plötzlichen Richtungsänderung der Geschwindigkeit; mathematisch gesehen eine (unendlich) große Beschleunigung der Strömung. Die (anfängliche) hintere Umströmung ist nicht stabil und kann daher nicht lange bestehen. Dies hat zur Folge, dass die Strömung an der Hinterkante sehr rasch ablöst. Gleichzeitig bildet sich ein Wirbel durch das Aufrollen einer sich ablösenden Grenzschicht. Dieser sog. Anfahrwirbel schwimmt mit der Strömung nach hinten ab. Nach dem Satz von Thompson ist die Gesamtzirkulation im Gleichgewicht (Summe ist Null); dies hat zur Folge, dass sich um das Tragflügelprofil herum ein zweiter, entgegengesetzt drehender Wirbel bildet. Dieser sog. gebundene Wirbel stellt die notwendige Zirkulation um den Tragflügel. Der gebundene Wirbel entsteht somit aus der vom Profil verursachte unsymmetrische Umströmung, bei der das Fluid auf der Unterseite verzögert, und auf der Oberseite des Profils beschleunigt wird.

Druckverteilung. Das gegenüber dem herrschenden Normaldruck relative Unterdruckgebiet auf der Profilkonturoberseite und das gegenüber dem herrschenden Normaldruck relative Überdruckgebiet auf der Profilkonturunterseite repräsentieren das Auftriebs- bzw. Querkraftgebaren des Tragflügelprofils. Dabei trägt relative Unterdruckgebiet auf der Profilkonturoberseite wesentlich (3/4) zur Gesamtquerkraft bei. Der Druckgradient korreliert nach der Energiegleichung mit der Geschwindigkeit (und deren Änderung) an der Profilkontur. Die Strömung hat grundsätzlich die Tendenz, der Profilkontur zu folgen. Direkt an der Profiloberfläche (Kontur) ist die Geschwindigkeit gleich Null. Sie wird größer mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche, bis sie die Umgebungsgeschwindigkeit erreicht. Die Viskosität der Grenzschicht bedingt im realen Fluidströmungsfeld eine (vertikale) Scherung der Horizontalströmung. Durch diese Scherung hat das Fluid in der Grenzschicht eine Wirbelstärke. Die Viskosität des Fluids bedingt eine Dissipation von Strömungsenergie; diese Dämpfung bewirkt eine Homogenisierung der Wirbelstärke und einen Vergleichmäßigung der Geschwindigkeitsgradienten benachbarter Stromlinien. Mit ansteigendem Anstellwinkel wächst auf der Saugseite des Profils die Gefahr der Strömungsablösung. Den größten Einfluss auf die Eigenschaften des Profils haben:

- Profilwölbung,
- Wölbungsrücklage,
- maximale Profildicke,
- die Änderung der Profildicke entlang der Profilsehne,
- Nasenradius,

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

- Hinterkante (Form der Skelettlinie nahe der Hinterkante – gerade Skelettlinie oder aufwärts geschwungen; Winkel zwischen Ober- und Unterseite an der Hinterkante).
- Der Auftriebsanstieg hängt im normalen Anwendungsbereich linear vom Anstellwinkel ab. Die Steigung  $\Delta C_a / \Delta \alpha$  beträgt für alle Profilformen etwa 0,11 pro Grad
- Der maximale Auftrieb wird von der Wölbung, dem Nasenradius und der Dicke bestimmt.

### Grenzschicht-Kriterien

Die Grenzschichttheorie<sup>4</sup> beschäftigt sich mit Fluidbewegung bei sehr kleiner Reibung. Der Übergang von der laminaren (schichtenartigen, ruhigen) in die turbulente (unruhige, vermischende) Strömungsform stellt ein zentrales Problem der Strömungsmechanik dar. Diese Transition tritt bei Scherströmungen auf, also dann, wenn sich in einem Fluid die Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptgeschwindigkeitsrichtung stark ändert. An jedem um- oder durchströmten Körper bildet sich direkt an der Körperoberfläche eine Grenzschicht aus, innerhalb der sich die Geschwindigkeit des Fluids aufgrund Reibung an die Geschwindigkeit der Körperoberfläche angleicht. Diese Grenzschicht verursacht im laminaren Zustand einen erheblich geringeren Reibungswiderstand als im turbulenten Zustand. Sehr kleine Störungen mit Wellencharakter (die Tollmien-Schlichting Wellen) werden mit zunehmender Laufstrecke in der Grenzschicht verstärkt. Sie verursachen einen Übergang zur turbulenten Grenzschicht und damit einen höheren Widerstand.

In der Grenzschicht eines fluiddynamisch wirksamen Körpers besitzt die Reibung Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil des Fluids. In der Regel ist die Strömung erst laminar (lat. lamina, „Platte“), dann turbulent; Verwirbelungen und Querströmungen herrschen vor. Die laminare Strömung ist eine Fluidbewegung, bei der keine sichtbaren Turbulenzen auftreten: Das Fluid strömt in Schichten, die sich nicht miteinander vermischen. alle Teile der Grenzschicht einer parallelen Strömung sind der Hauptströmung gleichgerichtet.

**Die Laminare Unterschicht** ist, abhängig vom Fluid, nur wenige Millimeter dick. Die Fluidströmung ist hier laminar. Erst in einer darüber liegenden Schicht ist die Strömung turbulent. Alle Vertikaltransporte von Impuls, Energie und Stoff erfolgen durch Molekularbewegungen (Geschwindigkeitsfluktuationen). Die kinetische Energie (Strömungs-

---

<sup>4</sup> Ludwig Prandtl (\* 4. Februar 1875 in Freising; † 15. August 1953 in Göttingen) war ein deutscher Physiker. Er lieferte bedeutende Beiträge zum grundlegenden Verständnis der Strömungsmechanik und entwickelte die Grenzschichttheorie und führte die Grenzschichttheorie im Jahr 1904 bei einem Vortrag auf dem Heidelberger Mathematiker-Kongress ein.

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

energie) der turbulenten Schicht ist wesentlich größer als in der laminaren Schicht, mit der Folge, dass der Strömungswiderstand der turbulenten Grenzschicht größer ist (Newton'sches Reibungsgesetz). Die Umgebungsströmung nährt die turbulente Grenzschicht, d.h. aus der Außenströmung wird durch Impulsaustausch der turbulenten Grenzschicht ständig Energie zugeführt. Dieser Energietransport ist dafür verantwortlich, dass der vertikale Geschwindigkeitsgradient sehr steil verläuft. Dies wiederum führt zu einer gewissen Robustheit der turbulenten Grenzschicht; sie ist unempfindlicher gegenüber einer Ablösung der Strömung. Die turbulente Grenzschicht überwindet (im Gegensatz zur laminaren Grenzschicht) deshalb ohne Ablösung einen bis zu dreifachen Druckanstieg an der Tragflächenprofilkontur. Die laminare Unterschicht ist eine viskose Schicht in Wandnähe; sie unterliegt der turbulenten Grenzschicht. Die Ursache der laminaren Unterschicht wird mit Schwankungskomponenten der Geschwindigkeit in Wandnähe des Strömungskörpers erklärt, die superponierbar sind. Infolge Haftbedingung (an der Wand wird das Fluid durch Reibung zum Stillstand gebracht) Reflektionen (Wand), Dämpfung (Fluid) und der Superponierbarkeit der Strömungsanteile kommt es zu einer Homogenisierung und zur Ausbildung einer sehr dünnen, diskreten konturnahen Schicht. Deren Dicke beträgt nur 2% bis 5% der gesamten Grenzschicht aus laminarer Unterschicht und turbulenter Oberschicht. Je weiter ein Fluidteilchen (in der laminaren Unterschicht) von der Wand entfernt ist, desto höher ist dessen Geschwindigkeit. Von der Wand bis zur Grenze der Grenzschicht kann das Geschwindigkeitsprofil als quadratische Funktion angenähert werden.

**Umschlagpunkt.** Der Umschlag der laminaren Grenzschicht in eine turbulente Schicht (Transition zur Turbulenz) ist aus physikalischer Sicht ein Stabilitätsproblem. Die mathematische Beschreibung (Grenzschicht-Differentialgleichungen) des Umschlags der laminaren Grenzschicht in eine turbulente Schicht wird mit instabile Störungen, so genannten Tollmien-Schlichting(TS)-Wellen äußerster Komplexität in Verbindung gebracht, deren Physik bislang nicht vollständig beschrieben ist und die nur schwer beschreibbaren Zuständen der laminaren Unterschicht begründet. Aber es gibt experimentelle Lösungen.

In Strömungsversuchen taucht regelmäßig das Phänomen auf, dass der Umschlagpunkt der laminaren in die turbulente Grenzschicht (Transition zur Turbulenz) an der Stelle des Druckminimums der Außenströmung auftritt. Die Zustandsgrößen der Außenströmung ihrerseits können genügend genau mit einem potentialtheoretischen Berechnungsansatz ermittelt werden. Auf diese Weise werden die Umschlagpunkte an der unteren und an der oberen Profilkontur ansatzweise berechnet.

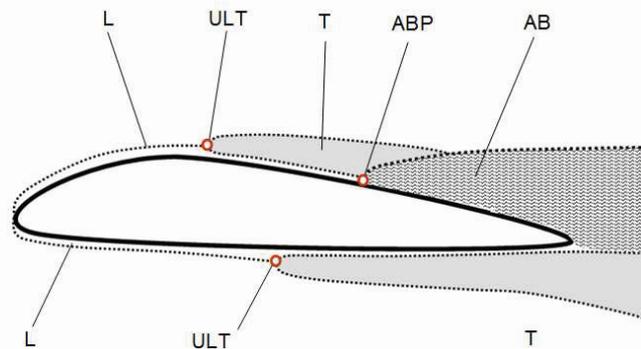
## Unter- und Überkritische Strömung.

Als unterkritische Profilmströmung wird die laminare Grenzschicht benannt. Überkritische Strömung herrscht, wenn der laminaren Strömung eine turbulente Strömung nachfolgt. Der Umschlag von einem unterkritischen Zustand in den Überkritischen Zustand erfolgt bei umso kleineren Geschwindigkeiten, je schlanker ein Strömungskörper ist.

Die Korrelation zu den entsprechenden Reynoldszahlen ist in der Strömungsmechanik üblich. große Reynoldszahlen: die Strömung ist turbulent, d. h. innerhalb der Grenzschicht können die Teile der Strömung bis hinab in den molekularen Bereich jede Richtung annehmen, ihre Dicke bleibt jedoch eng begrenzt. In der Hauptströmung bleibt die Geschwindigkeit konstant verteilt. Anschaulich gesprochen führt eine Konturverbreiterung zum lokalen Anlegen der Strömung an den Strömungskörper. Auf diese Weise kann eine Strömung über die Konturgeometrie über eine gewisse (aber nicht beliebig lange) Strecke der Tragflügelwand im Sinne einer Laminarisierung konditioniert werden. Dies ist (eins von mehreren) Gestaltungskonzepten für ein unterkritisches Laminarprofil.

Bei scharfkantigen (gegebenenfalls schlanken) Strömungskörpern erfolgt der Umschlag von laminarer Strömung in turbulente Strömung direkt an der Strömungskörperspitze. Hier wird die Strömung schlagartig turbulent. Am dreidimensionalen Tragflügel kann es bei schräger Anströmung direkt an der Strömungskörperkante zu einer Ablösung kommen. Man unterscheidet zwischen dem Ort des Strömungsumschlags und dem Ort des Ablösezustands an einer Tragflügelprofilkontur.

**Laminarblasen.** Bei der Strömungablösung entfernt sich die Grenzschicht von der Profilkontur bzw. der Tragflügelwand; es entsteht ein Wirbel-Rückströmgebiet. Der Strömungspfad durchläuft die Stationen: laminare Grenzschicht, Umschlagpunkt von laminarer in turbulente Strömung, turbulente Grenzschicht, Ablösepunkt und Ablösegebiet. Die Reihenfolge, nicht aber das Einhalten aller Stationen

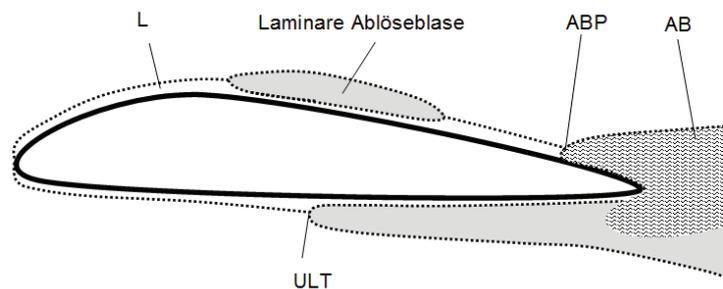


ULT	Umschlagpunkt (laminar in turbulent)
L	laminare Grenzschicht
T	Turbulenz
ABP	Ablösepunkt
AB	Ablösegebiet mit Rückströmung

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

ist obligat. Das Strömungsgebiet das erscheint, wenn der Strömungsabriss aus dem Laminargebiet heraus erfolgt, wird laminare Ablösung genannt. Von einer laminaren Ablöseblase spricht man, wenn hinter einem Ablösegebiet die Strömung wieder zum Anliegen an der Profilkontur kommt, wenn es dem Fluid gelingt, nach dem Umschlagen in den turbulenten Zustand genug Energie aus der Umgebung aufzunehmen, damit die die Strömung weiteren Konturänderungen folgen kann.

Laminarblasen sind instabil, hochdynamisch und nichtkontrollierbar.



### Einfache Grenzschichtmodelle

In der vorliegenden Untersuchung wird ein potentialtheoretisches Verfahren zur Profilanalyse verwendet, das um einem einfachen Ansatz von Eppler [Eppl-75] zur quantitativen Beschreibug der Wechselwirkungsvorgänge in der Grenzschicht der Profilkontur erweitert wurde [Hepperle]. Das integrale Verfahren Epplers basiert auf Differentialgleichungen die das Anwachsen der Grenzschicht in Abhängigkeit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit in Konturnähe. Während für laminare Grenzschichten genügend genaue analytische Beziehungen verfügbar sind, muss um den turbulenten Teil zu modellieren auf Vereinfachungen und empirische Korrelationen zurückgegriffen werden.

**Transition.** Die Methoden, den Übergang von der lamionaren zur turbulenten Grenzschicht zu modellieren basieren auf den Arbeiten P Prandtls zur Grenzschichttheorie. Die lokalen Parameter der Grenzschicht sind das Ergebnis einer Integration, beginnend mit dem Staupunkt der Profilkontur. Auch die modernen numerischen Methoden zur Untersuchung der Stabilität einer Grenzschicht verwenden empirische Beziehungen, die in erster Linie aus Experimenten abgeleitet wurden. Auch die Wirkung der Oberflächenbeschaffenheit auf Transition und Widerstand ist äußerst komplex und selbst heute noch nicht vollständig verstanden. Man weiß, dass eine raue Oberfläche die laminare Strömung destabilisiert, was zu einem vorzeitigen Übergang von der laminaren zur turbulenten Unterschichtströmung führt. Laminare und turbulente Strömung auf rauen Oberflächen erzeugen einen höheren Reibungswiderstand. Um die Koordinaten der Kontur vorherzusagen, an denen der Übergang von der laminaren zur turbulenten Grenzschicht

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

erfolgt, werden in einfachen Modellen (Eppler) bestimmte Kriterien auf die lokalen Strömungsgrößen angewandt. Transition taucht auf, wenn eine bestimmte lokale Strömungsgeschwindigkeit überschritten wird:

$$\text{Eppler-Modell}^5: \text{Re}_{\delta_2} > e^{18,4 H_{\delta_2} - 21,74 - 0,36 k}$$

$\delta_2$  bedeutet die Impulsverlustdicke (momentum loss thickness) die mit einer empirischen Beziehung aus der lokalen Strömungsgeschwindigkeit ( $\text{Re}_x$ ) an der Stelle  $x$  der Kontur ermittelt wird:

$$\begin{aligned} \text{Impulsverlustdicke:} \quad \delta_2 \text{ [m]} &= 5,0 \cdot (\text{Re}_x)^{-1/2} \sim x^{1/2} \\ \text{Lokale Reynolds-Zahl} \quad \text{Re}_x &= v_\infty \cdot x_c / \nu \\ \text{Achsenlänge (chord)} \quad x_c & \end{aligned}$$

**Aktive Strömungskontrolle** ist nicht Gegenstand dieser Profilvalidierung. Dennoch ist der kontrollierte Strömungsabriss eine der rezenten Herausforderungen bei der Entwicklung technischer Leit- und Steuerflächen. In Forschung und Entwicklung wird intensiv daran gearbeitet, den laminar-turbulenten Übergang (Transition zur Turbulenz) an Leit- und Steuerflächen zu größeren Flügeltiefen zu verlagern, um den Reibungswiderstand zu verringern. Um die Strömungsablösung am Tragflügel zu verhindern, werden bereits vielfach Wirbelgeneratoren, so genannte Turbulatoren verwendet. Auch biologische Strukturen zur Strömungsbeeinflussung rücken immer mehr in das Interesse der Ingenieure. So besitzt das von der Geometrie einer technischen Profilkontur erheblich abweichende Profil des Libellenflügels (Zick-Zack-Profilierung) erstaunlich gute fluidmechanische Eigenschaften. Eine weiteres Verfahren der (aktiven) Strömungskontrolle zur Widerstandsminderung besteht in der möglichst langen Laminarhaltung der Umströmung durch die Dämpfung instabiler Störungen. Tollmien-Schlichting(TS)-Wellen sind derartige instabile Störungen, die (aufgrund ihrer Superponierbarkeit) gezielt ausgelöscht werden können, wenn durch eine geeignete Aktuatorik eine produktive Gegenwelle erzeugt wird (direkte Dämpfung). Ein weiterer Mechanismus zur Dämpfung von TS-Wellen ist die Verwendung nachgiebiger Oberflächen. Die Interaktion von Fluid und Körperwand kann hierbei zur Dämpfung der instabilen Störungen führen. Inspiriert ist dieser passive Mechanismus durch die biologische Delfinhaut. Die Frequenz dieser TS-Störwellen hängt vom Fluid und der Strömungsgeschwindigkeit ab und beträgt typischerweise  $10E^2$  Hz bis  $10E^3$  Hz.

---

<sup>5</sup> Angabe der Rauigkeit  $k$  in [m]

# Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

## Messblätter

Es werden potentialtheoretische Untersuchungen zu den synthetischen Profilkonturen der ERpL-Serie durchgeführt. Das symmetrische Profil ERpL[p1][p2] (ERpL für **E**lliptic **R**igid **p**er **L**ength) mit den beiden beschreibenden Parametern "spezifische Profildicke  $p1=d/t[\%]$  und Wölbungsrücklage  $p2=xf/t [\%]$ " ist hier gegeben in der Version:

## ERpL2050

spezifische Profildicke  $p1= \mathbf{d/t} = 20 [\%]$  und  
spezifische Wölbungsrücklage  $p2= \mathbf{xf/t} = 50 [\%]$

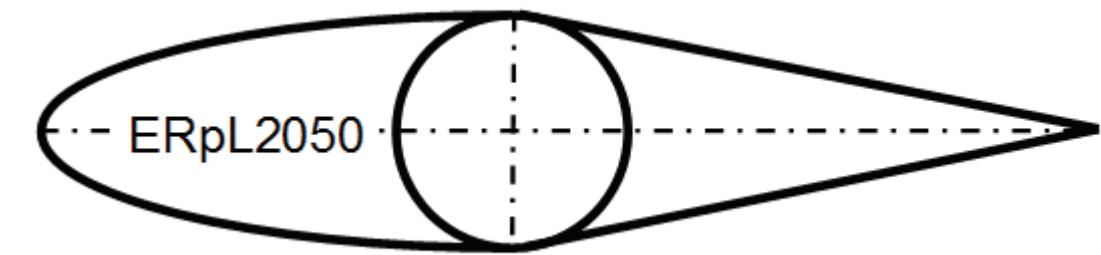
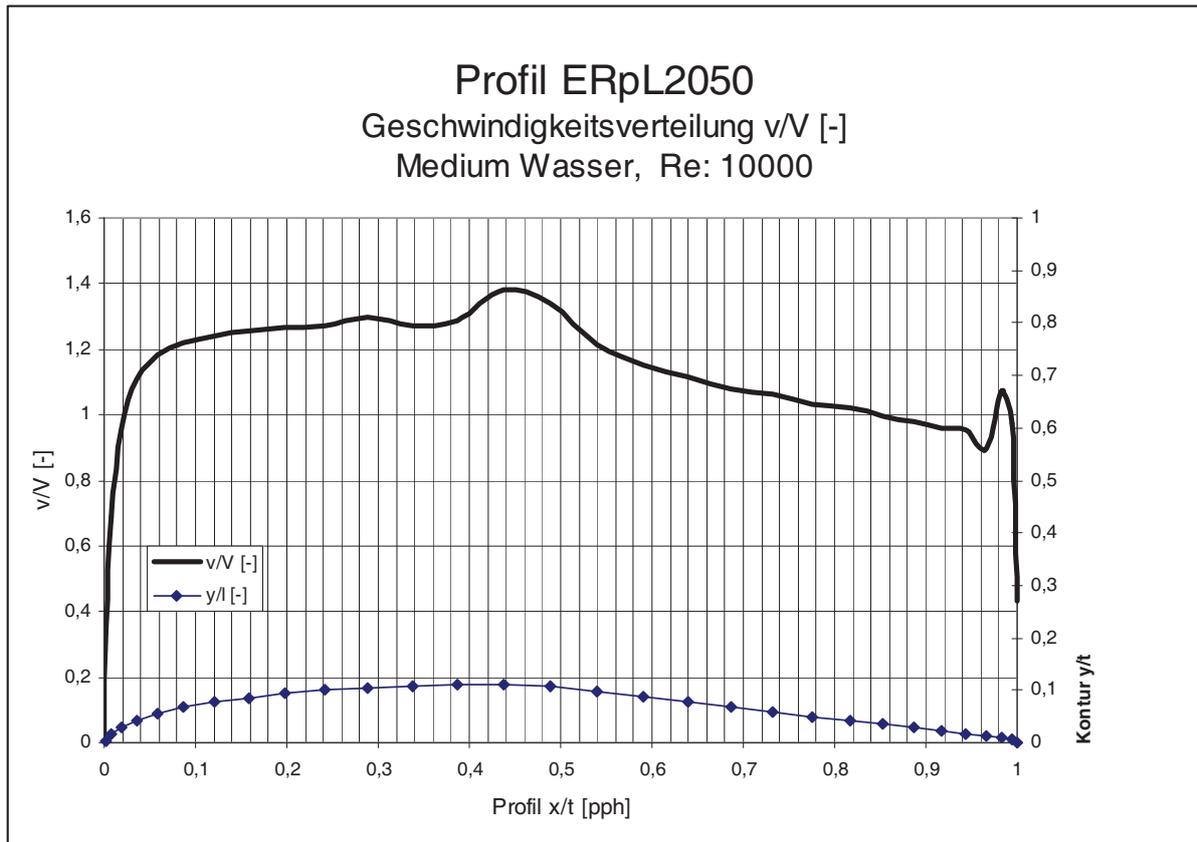
Im Anhang wird dargelegt, auf welche Weise mit diesen beiden Parametern eine Profilkontur der ERpL-Serie vollständig beschrieben wird.

Die Diagramme und die diesen Graphiken zugrunde gelegten Berechnungswerte sprechen für sich und werden in diesem Aufsatz nicht weiter kommentiert.

Die Graphiken betreffen:

- Geschwindigkeitsverteilung des zentral angeströmten ERpL-Profils. Die dargestellten generalisierten Geschwindigkeiten sind nicht signifikant für eine bestimmte Re-Zahl.
- Profilgraphik
- Polardiagramm der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte über den Anstellwinkel bei unterschiedlichen Reynoldszahlen für das Medium Wasser.
- Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte in einer expliziten Darstellung.
- Stall: Transition und Separation auf der Tragflächenoberseite (Stallseite) über den Anstellwinkel bei unterschiedlichen Reynoldszahlen für das Medium Wasser.

# Reihenuntersuchung zu Profilkonturen



## Allgemeine Größen und Kennwerte

Größe	Symbol	Einheit	Dimension
Leistung	$P$	$[\text{Nm s}^{-1}], [\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}], [\text{W}]$	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3}$
Energie	$E$	$[\text{Nm}], [\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}], [\text{J}]$	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$
Volumenelement	$(dx \, dy \, dz)$	$[\text{m}^3]$	$L^3$
Fläche	$A_{yz}$	$[\text{m}^2]$	$L^2$
Geschwindigkeit	$v_x$	$[\text{m s}^{-1}]$	$L \cdot T^{-1}$
Dichte (Fluid)	$\rho$	$[\text{kg m}^{-3}]$	$M \cdot L^{-3}$

# Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

## Symbolik, abgeleitete Größen und Kennwerte in der Profilanalyse

Tragflügelänge	b	[m]	
Profiltiefe (chord length, c)	t	[m]	
generalisierte x-Koordinate	x/l	[%]	
generalisierte y-Koordinate	y/l	[%]	
generalisierte (Kontur-) Geschwindigkeit	v/V	[%]	
Profildicke	d/t	[%]	
Profilwölbung	f/t	[%]	
Wölbungsrücklage	xf/t	[%]	
Nasenradius	r/t	[%]	
Hinterkantenwinkel	$\tau$	[°]	
überströmte Fläche des Flügels	A	[m <sup>2</sup> ]	$A = b \cdot t$
Seitenverhältnis (Flügel)	$\lambda$	[-]	$\lambda = A/b^2$
Auftriebsbeiwert (LIFT-Koeffizient)	$C_L$	[-]	
Widerstandsbeiwert (DRAG-Koeffizient)	$C_d$	[-]	
Momentenbeiwert MOMENT-Koeffizient)	$C_m$	[-]	
Druckbeiwert (pressure coefficient)	$C_p$	[-]	
kritischer Druckbeiwert <sup>6</sup>	$C_p^*$	[-]	
Reibungsbeiwert (local friction coefficient)	$C_f$	[-]	
Gleitzahl	G	[-]	$G = (C_L / C_d)$
Geschwindigkeit in [m/s],	v, w	[ms <sup>-1</sup> ]	
Schallgeschwindigkeit (speed of sound)	a	[ms <sup>-1</sup> ]	
Auftrieb, Querkraft, Lift	L	[N]	$L = c_a \cdot A \cdot v^2 \cdot \rho/2$
Formwiderstand	$W_F$	[N]	$W_F = c_w \cdot A \cdot v^2 \cdot \rho/2$
Reibungswiderstand	$W_R$	[N]	$W_R = c_r \cdot A \cdot v^2 \cdot \rho/2$
induzierter Widerstand	$W_I$	[N]	$W_I = c_i \cdot A \cdot v^2 \cdot \rho/2$
Beiwert glatte Oberfläche, laminar	$c_r$	[-]	$c_r = 1,327 \cdot (Re)^{-1/2}$
Beiwert glatte Oberfläche, turbulent	$c_r$	[-]	$c_r = 0,074 \cdot (Re)^{-1/5}$
Beiwert raue Oberfläche, turbulent <sup>7</sup>	$c_r$	[-]	$c_r = 0,418 \cdot (2 + \lg(t/k))^{-2,53}$
Beiwert des induzierten Widerstands <sup>8</sup>	$c_i$	[-]	$c_i = \lambda c_a^2 / \Pi$
Liftleistung	$P_L$	[W]	$P_L = L \cdot v$
Widerstandsleistung	$P_{WI}$	[W]	$P_{WI} = (W_F + W_R + W_I) \cdot v$
Konturposition	x	[m]	
Lokale Reynolds-Zahl	$Re_x$	[-]	$Re_x = Re_{\delta_2} = v_{\infty} \cdot x / \nu$
Verdrängungsdicke, Grenzschichtdicke <sup>9</sup>	$\delta_1$	[m]	
Grenzschichtdicke (laminar) <sup>10</sup>	$\delta_2 = \delta_{LAM}$	[m]	$\delta_{LAM} = 5,0 \cdot (Re_x)^{-1/2} \sim x^{1/2}$
Grenzschichtdicke (turbulent) <sup>11</sup>	$\delta_3 = \delta_{TURB.}$	[m]	$\delta_{TURB.} = k(x) \cdot (Re_x)^{-1/2} \sim x^{0,8}$
Konturbeiwert (shape factor <sup>12</sup> )	$H_{12}$	[-]	$H_{12} = \delta_1 / \delta_2$
Konturbeiwert (shape factor <sup>32</sup> )	$H_{32}$	[-]	$H_{32} = \delta_3 / \delta_2$
ULT <sub>LOWER</sub>	Umschlagpunkt, Transition: laminar-turbulent, lower surface		
ULT <sub>UPPER</sub>	Umschlagpunkt, Transition: laminar-turbulent, upper surface		
ABP <sub>LOWER</sub>	Ablösepunkt, Separation, lower surface		
ABP <sub>UPPER</sub>	Ablösepunkt, Separation, upper surface		

<sup>6</sup> kritischer Druckbeiwert <sup>6</sup> (critical pressure coefficient ind. supersonic flow )  $C_p^*$

<sup>7</sup> Angabe der Rauigkeit k in [m]. z.B. gilt als glatt:  $k = 0,001[\text{mm}] = 10^{-3} [\text{mm}] = 10^{-6} [\text{m}]$ .

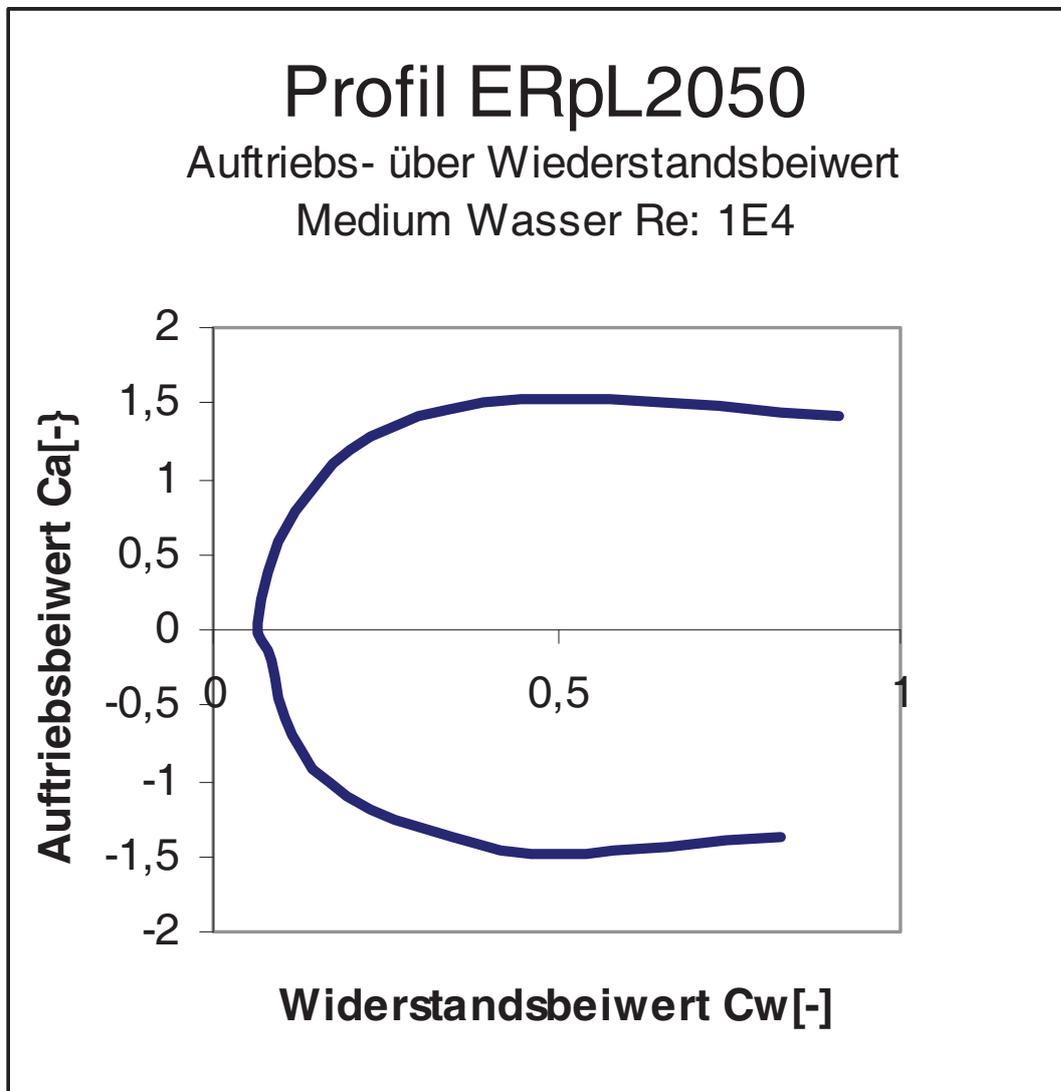
<sup>8</sup> gemäß elliptischer Auftriebsverteilung nach Prandtl

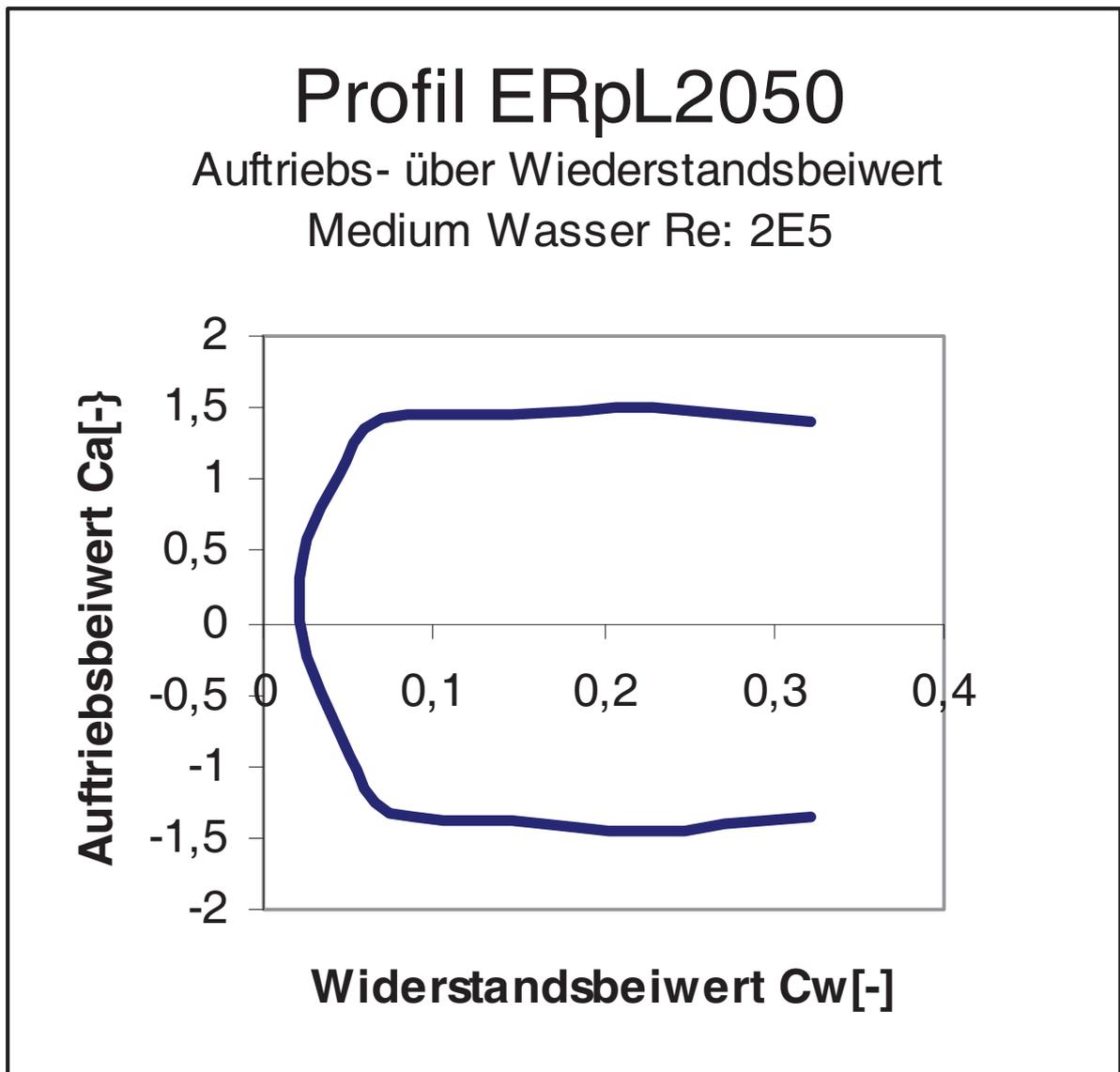
<sup>9</sup> Grenzschichtdicke (displacement thickness)  $\delta_1$

<sup>10</sup> auch ImpulsverlustDicke (momentum loss thickness )

<sup>11</sup> Dicke der turbulenten Grenzschicht (ebene Platte)  $\delta_{TURB.} = k(x)(Re_x)^{-1/2}$ . Der empirische Faktor k entspricht der Ordinate  $k=y(x)$ , im Falle der ebenen Platte. Auch EnergieDickenbeiwert (energy loss thickness)

Anhang 1 Diagramme

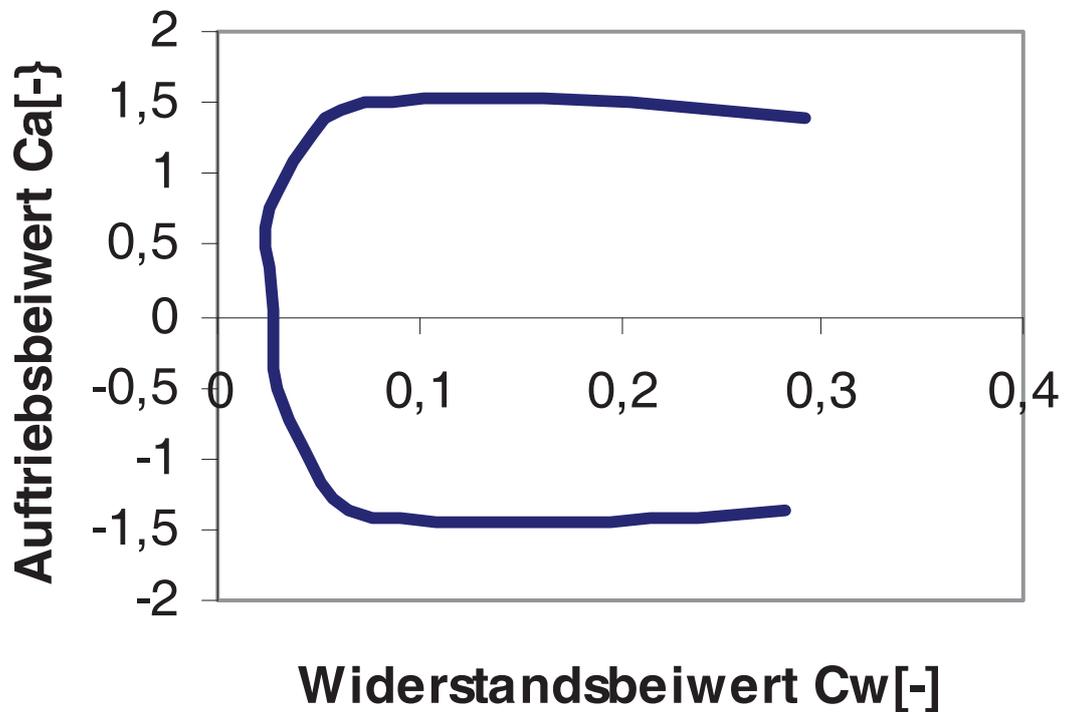


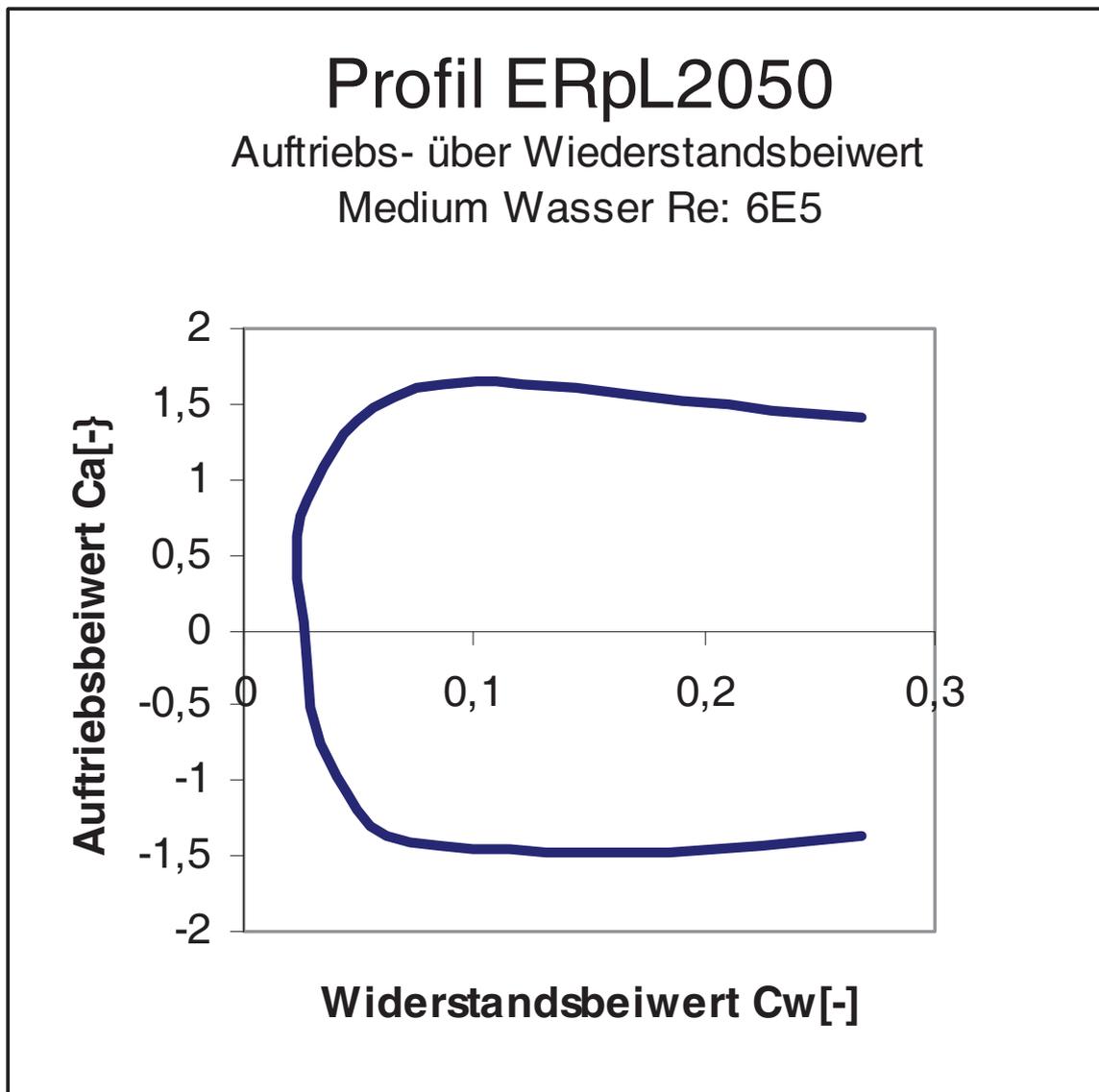


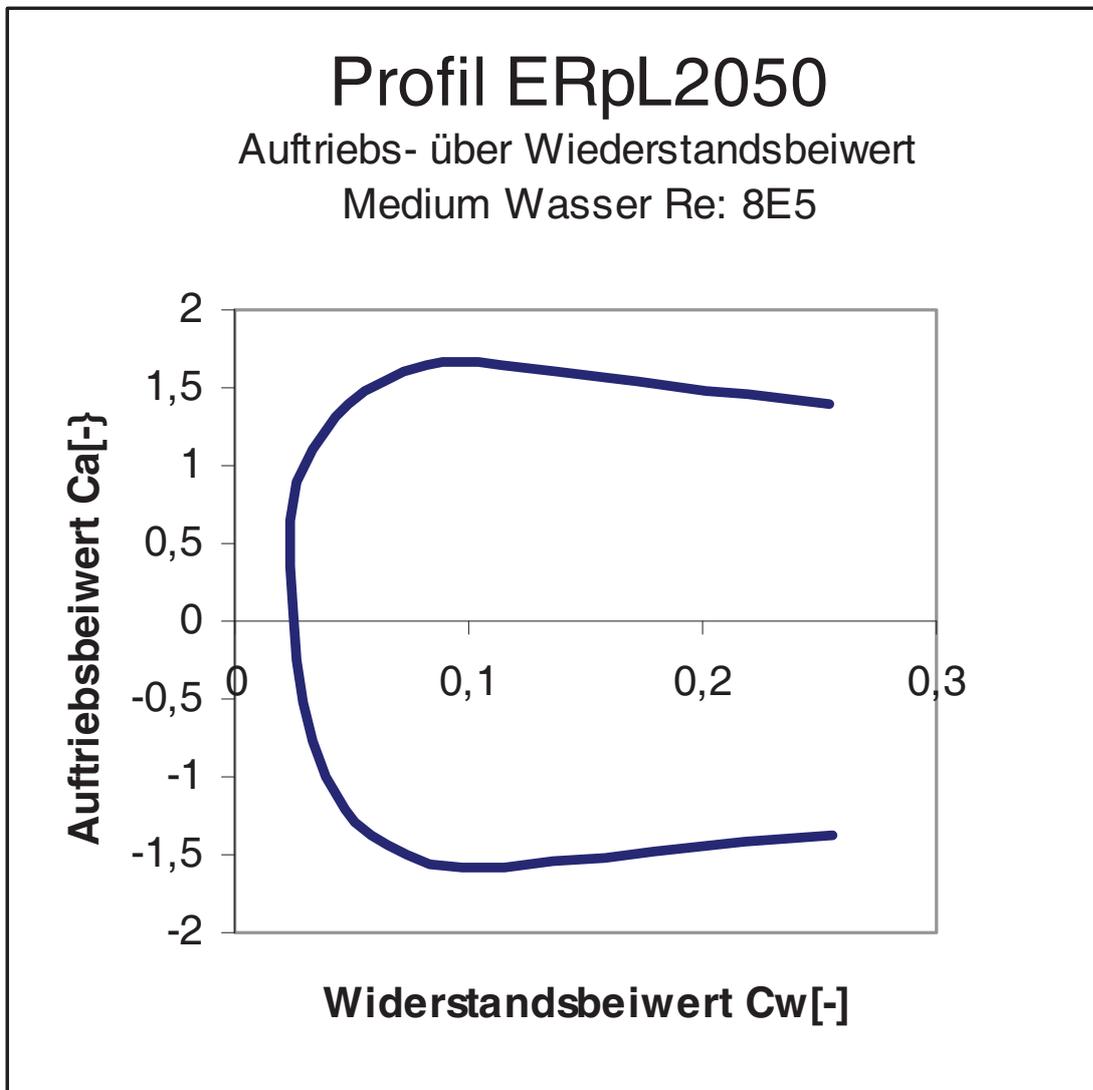
## Profil ERpL2050

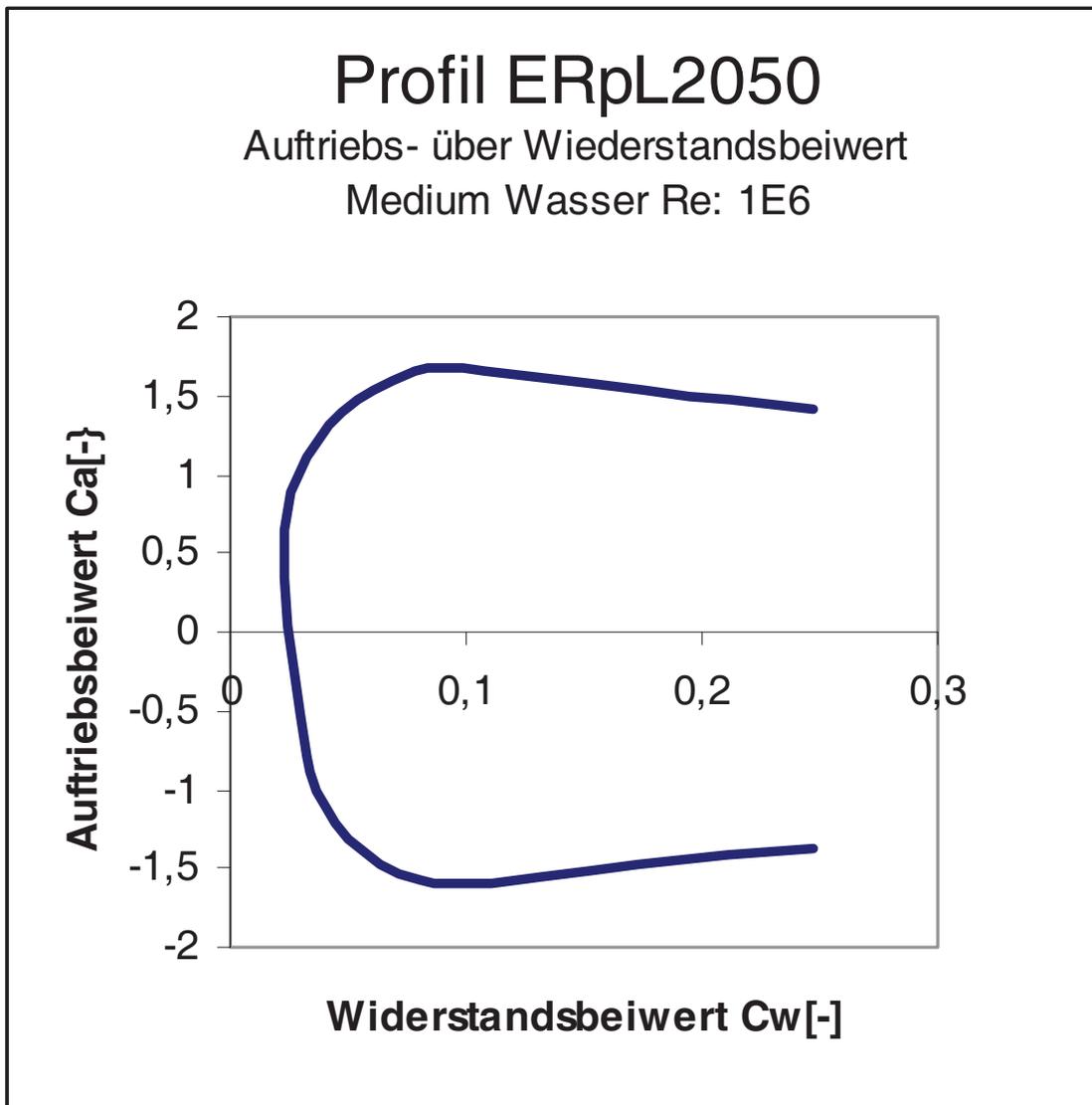
Auftriebs- über Widerstandsbeiwert

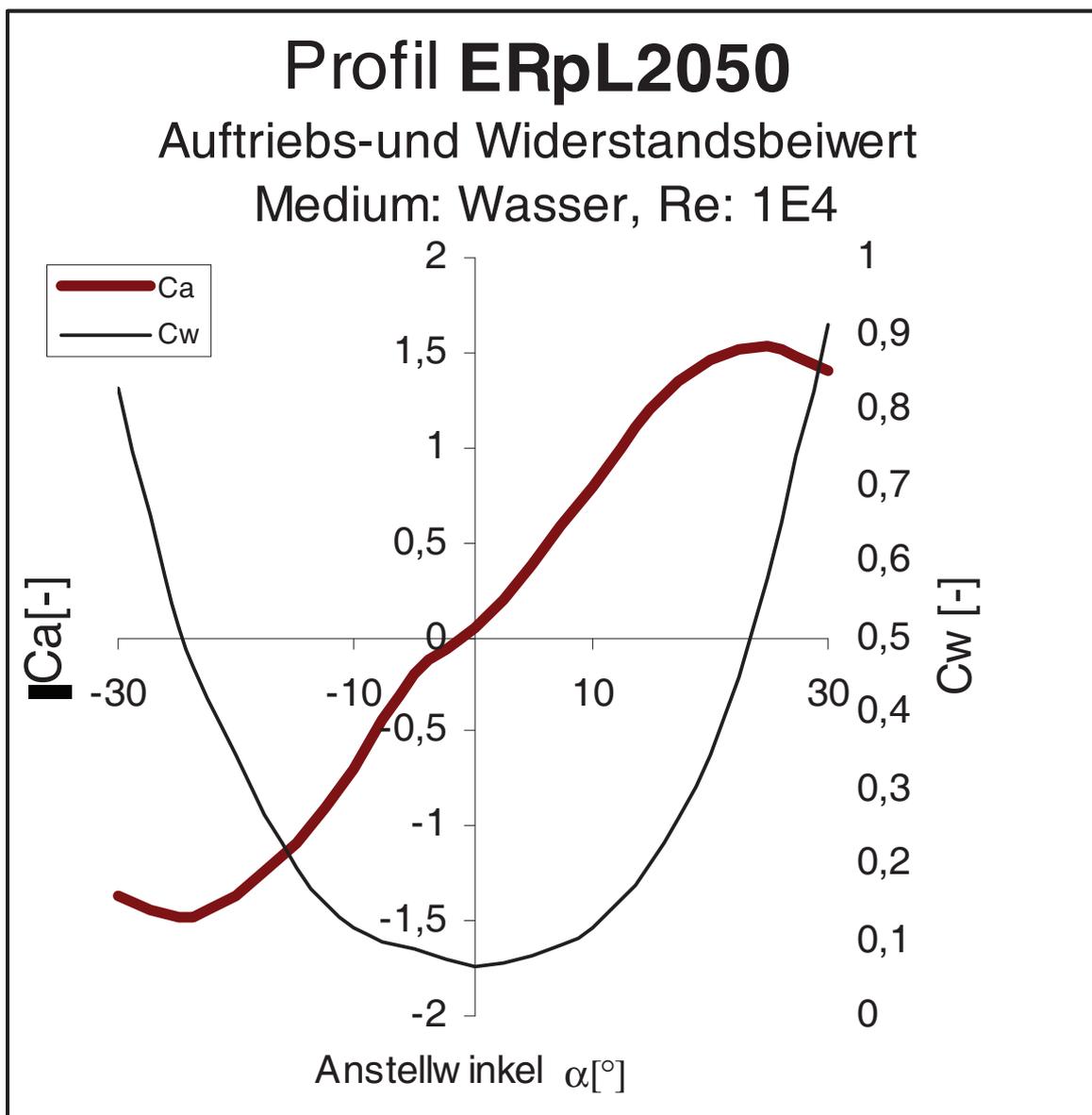
Medium Wasser Re: 4E5

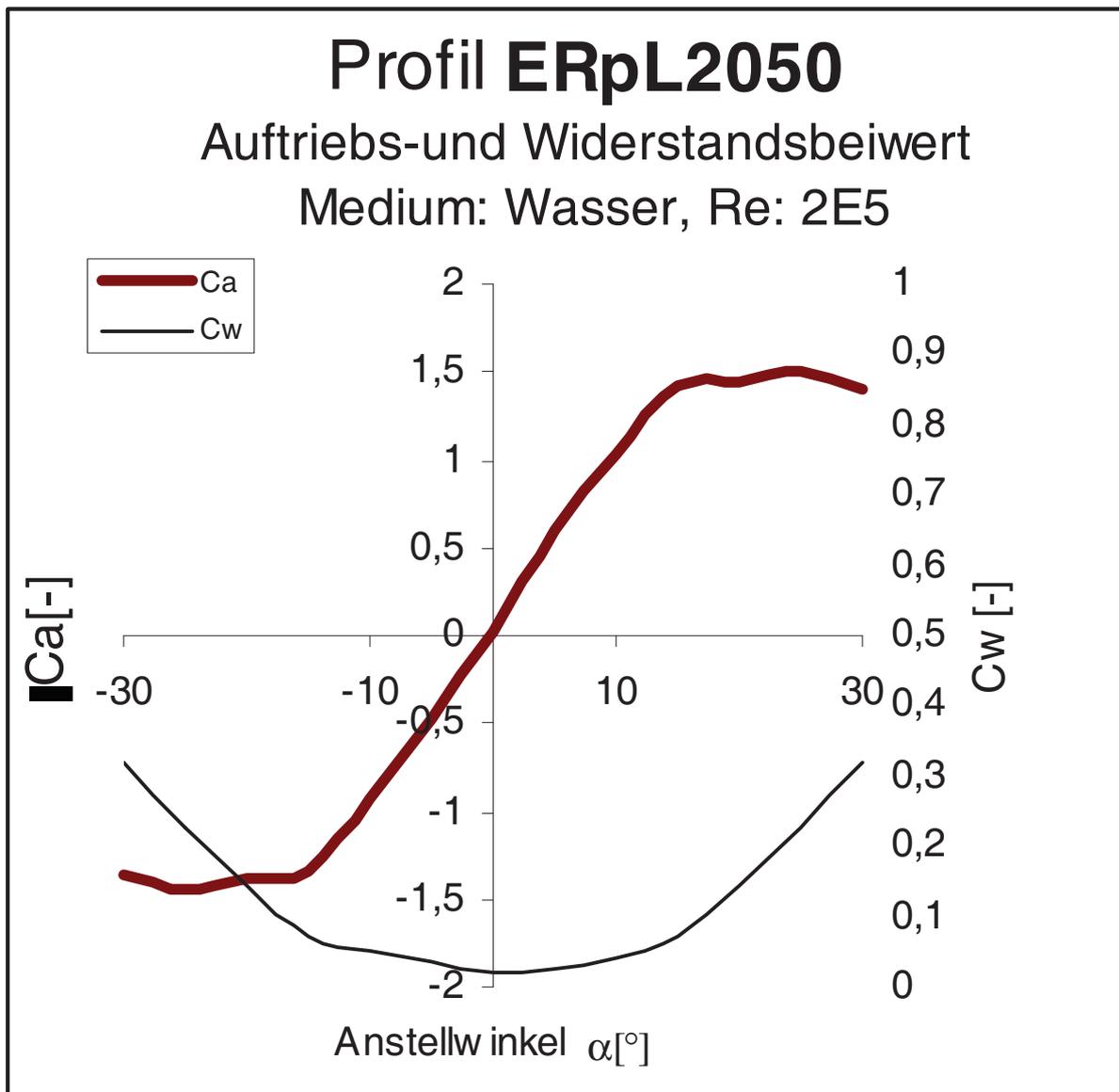


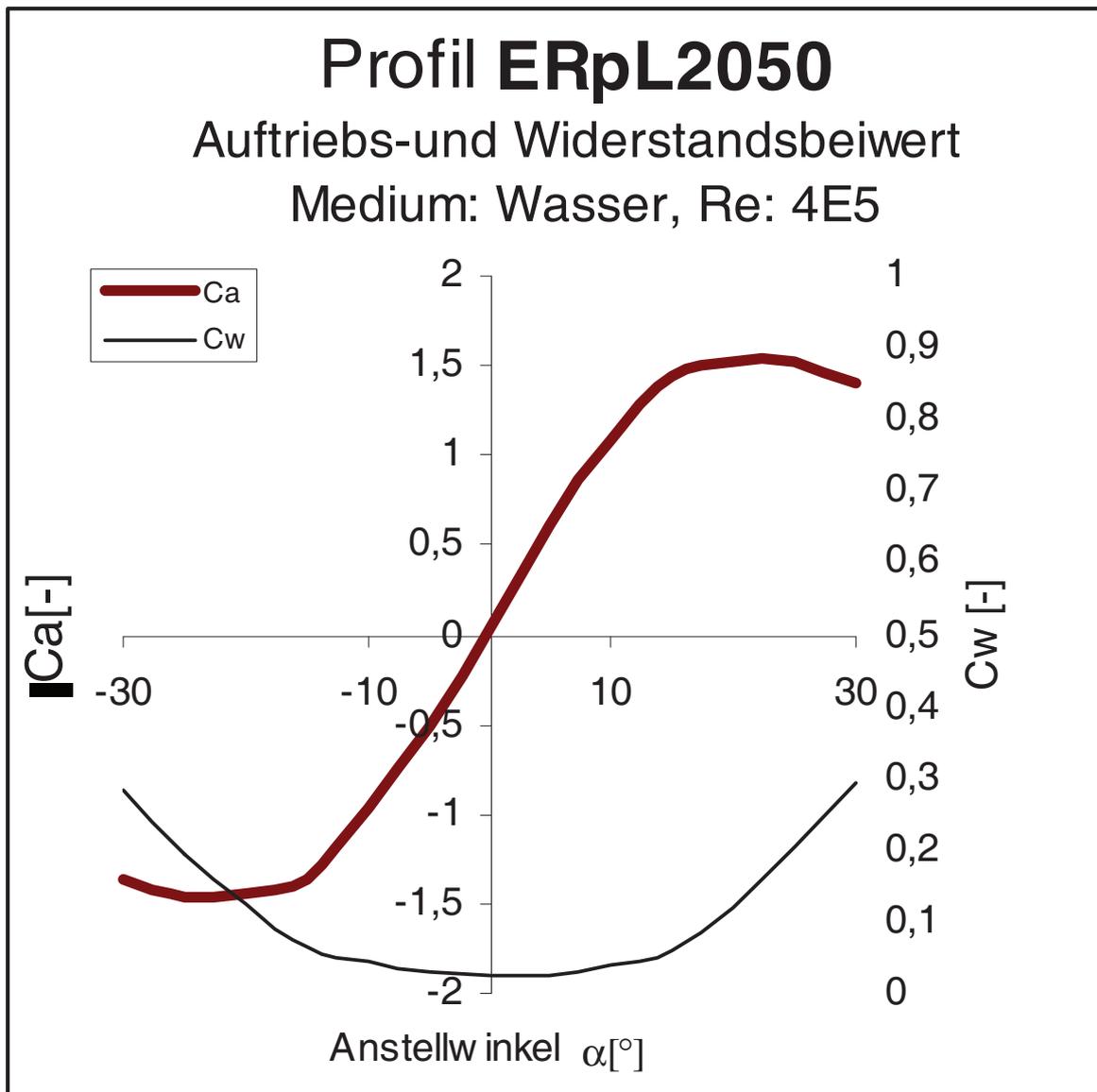


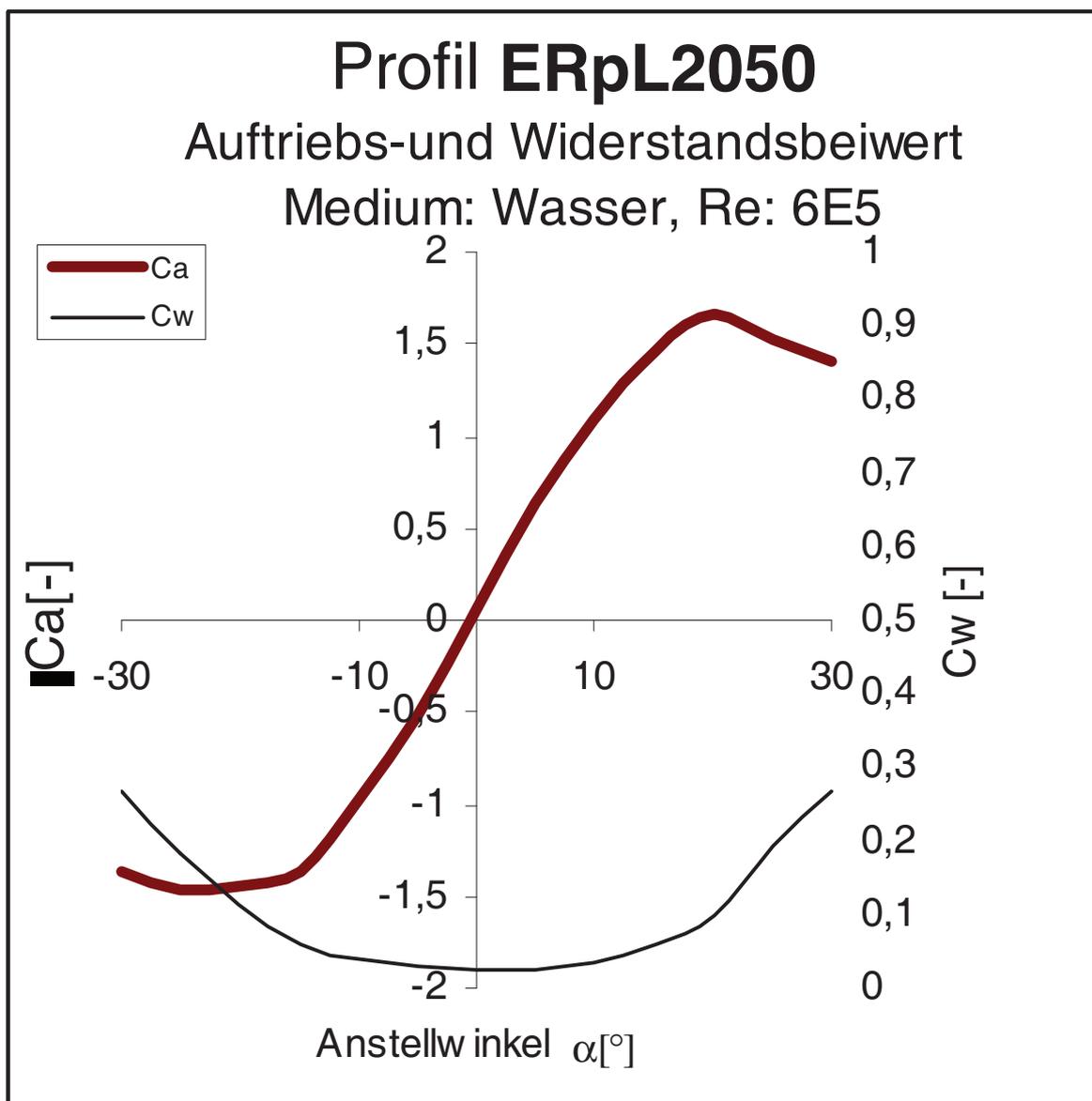


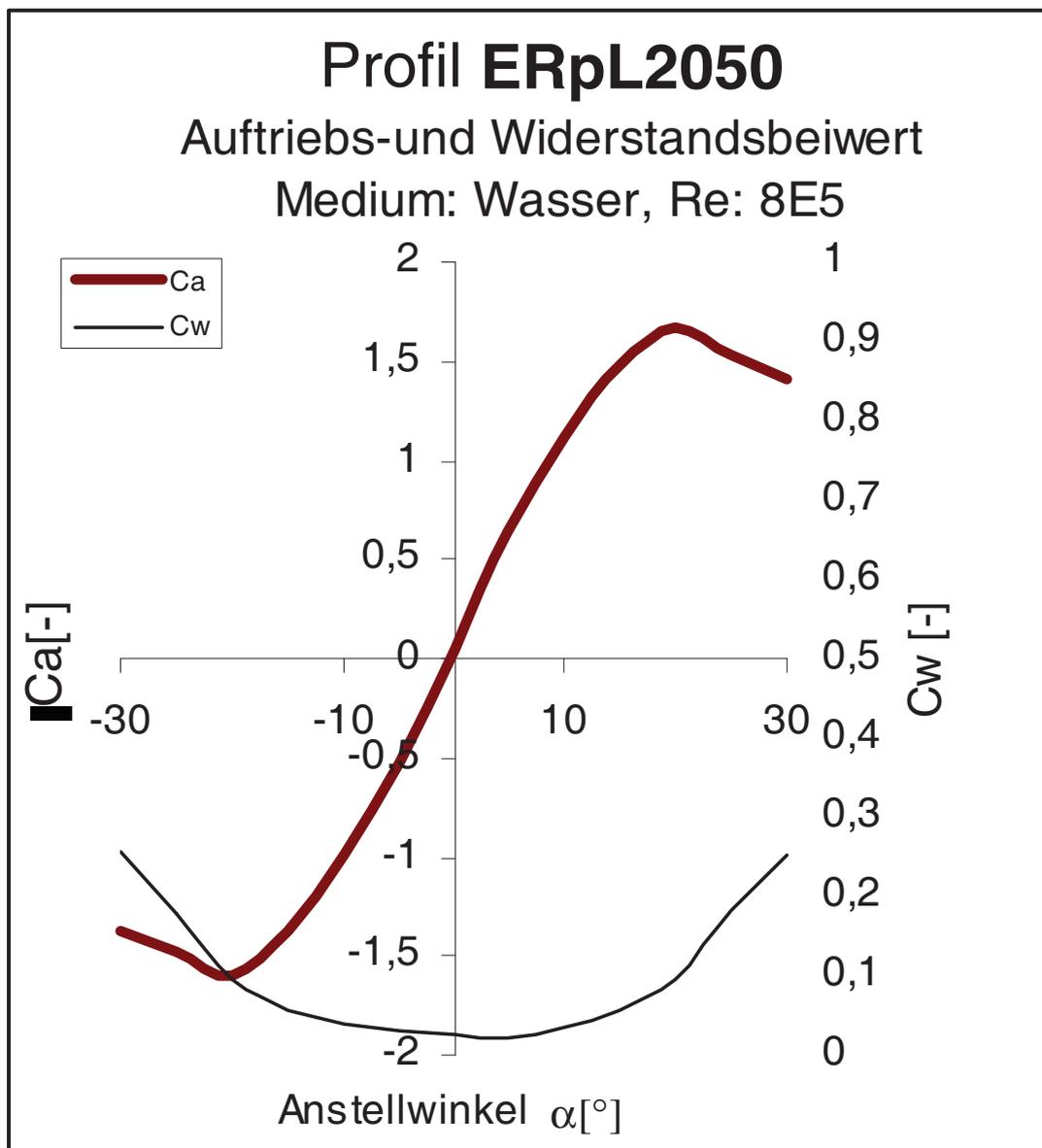


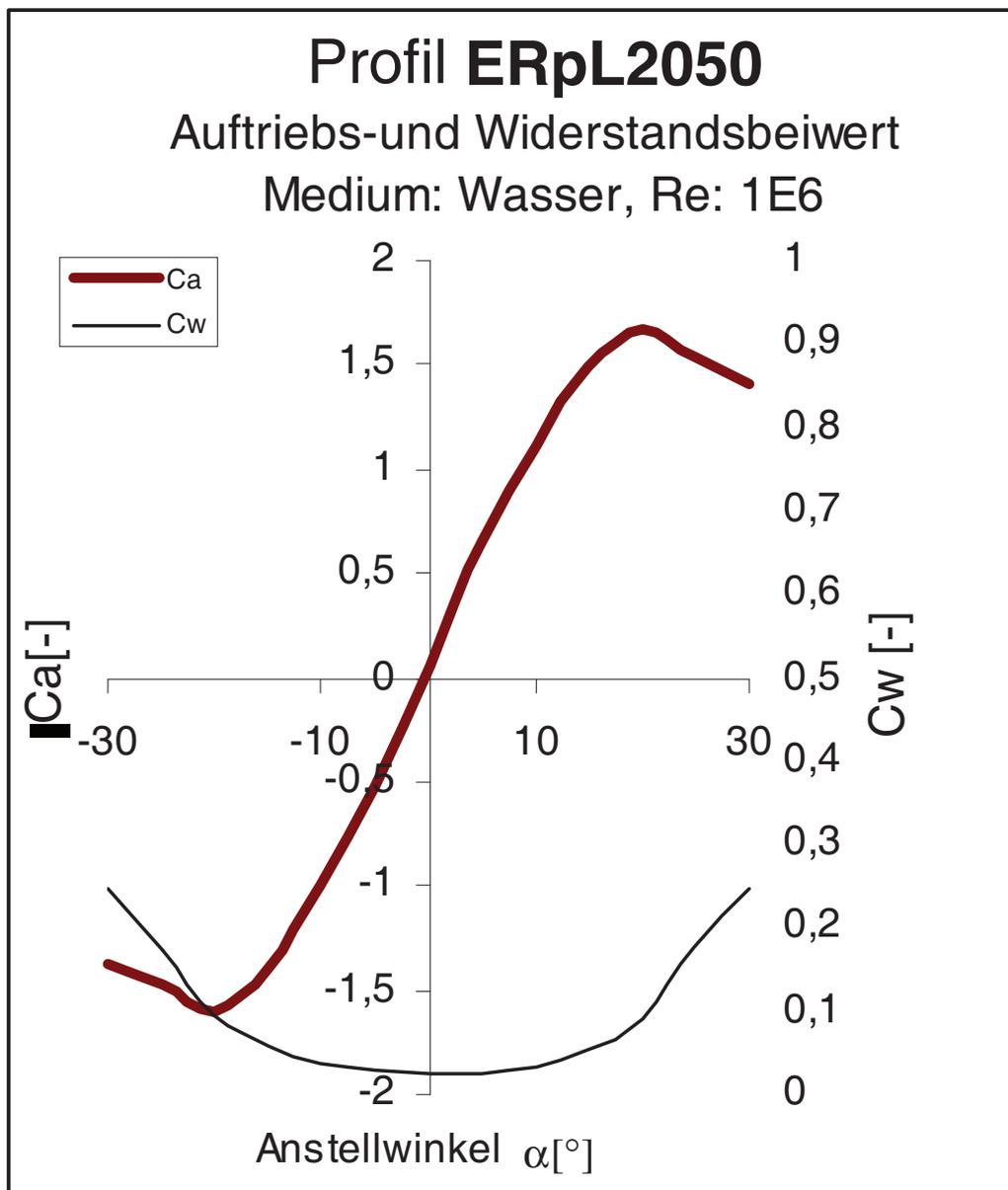


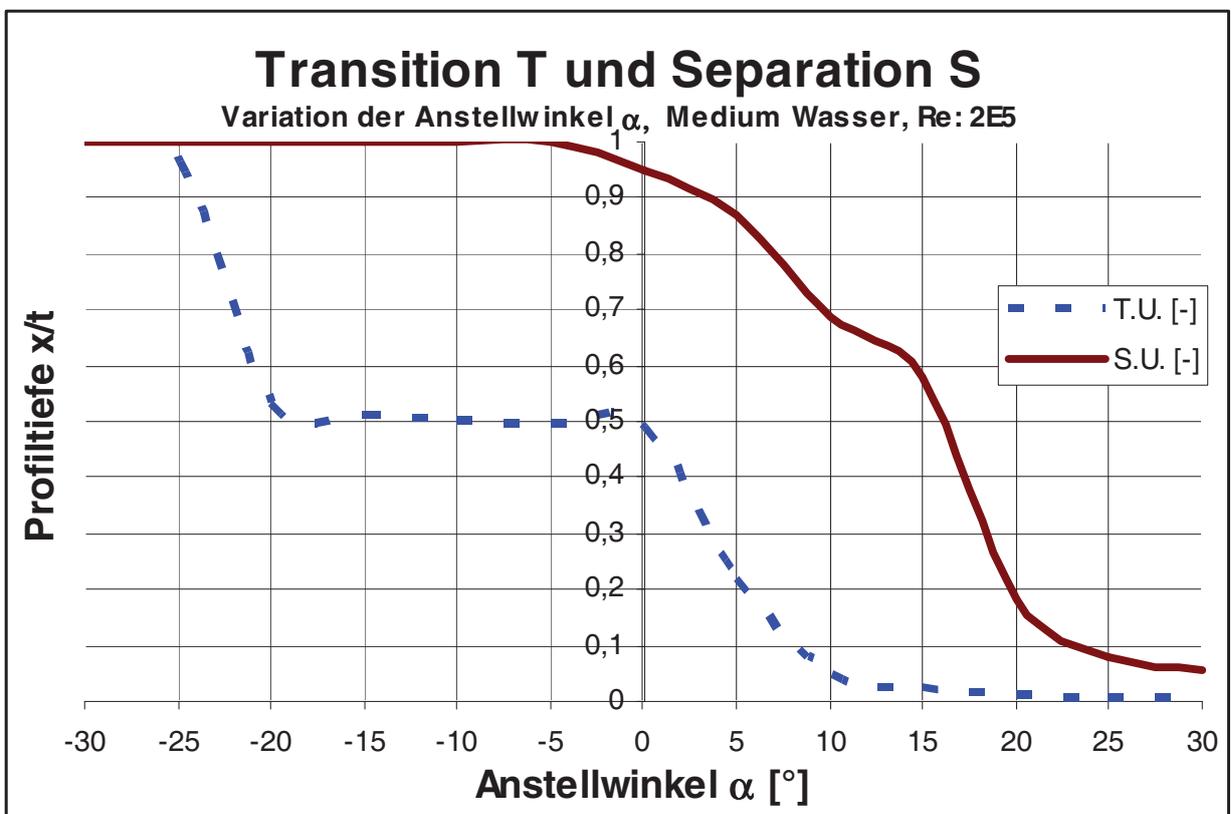
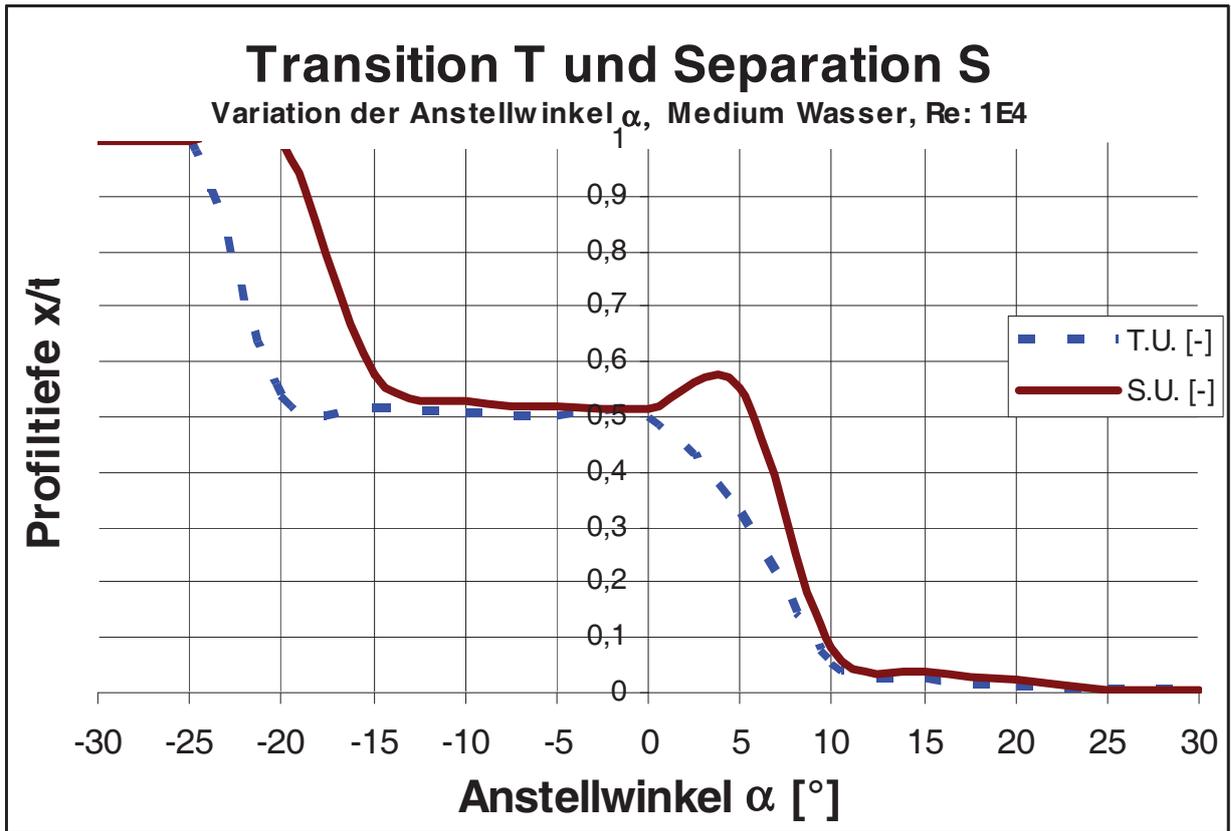


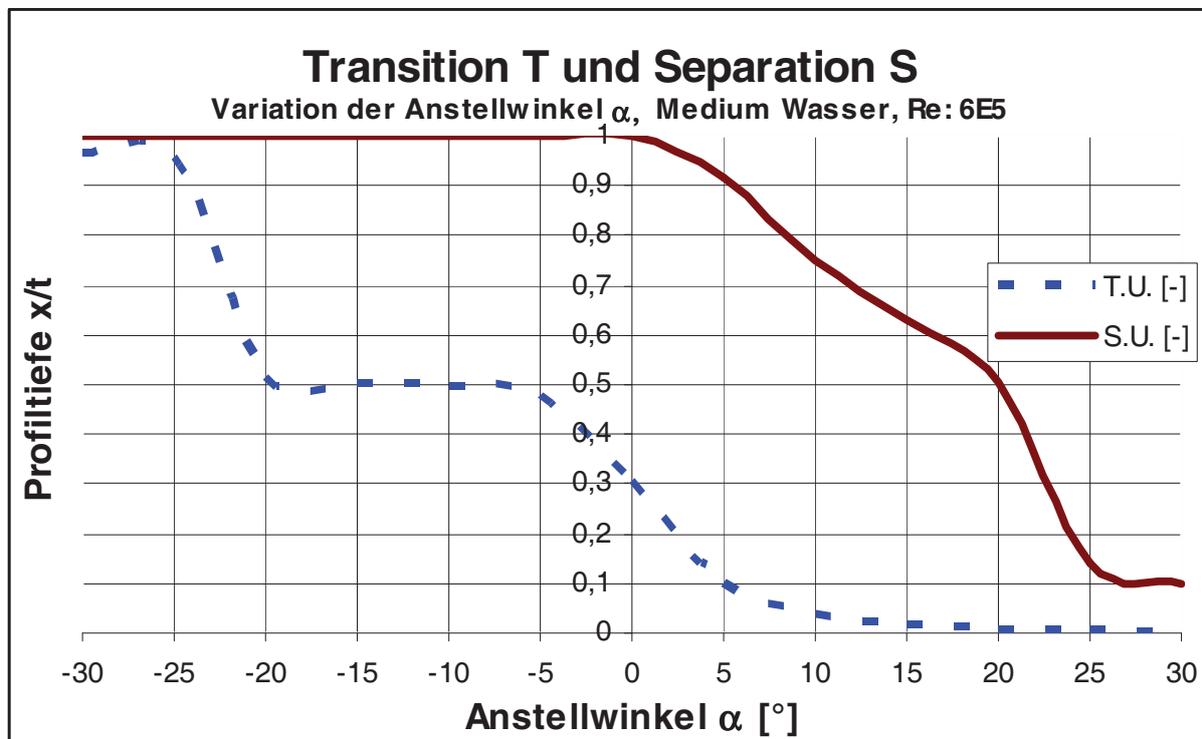
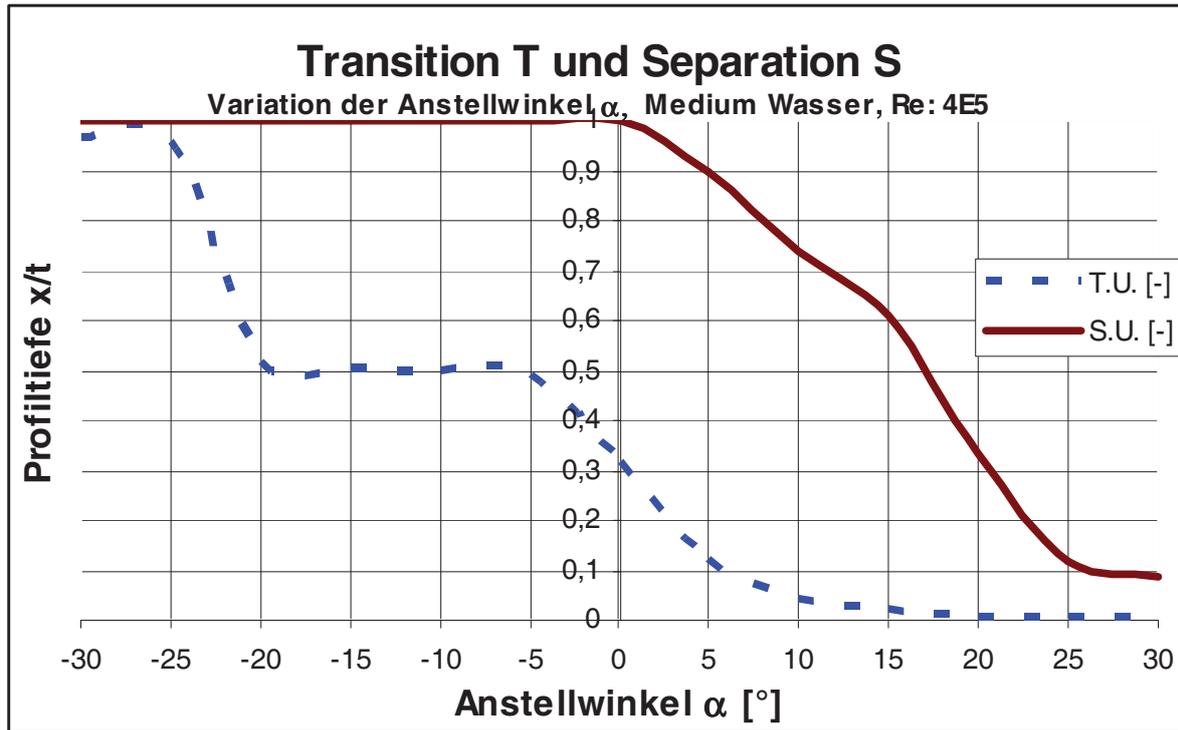


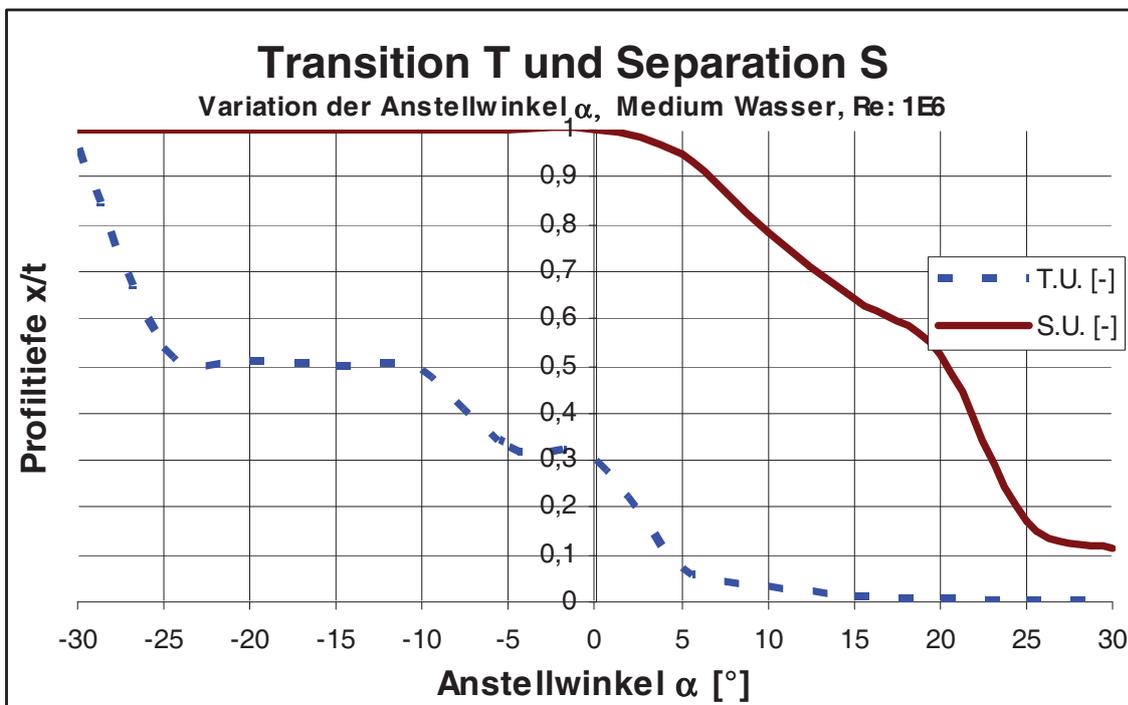
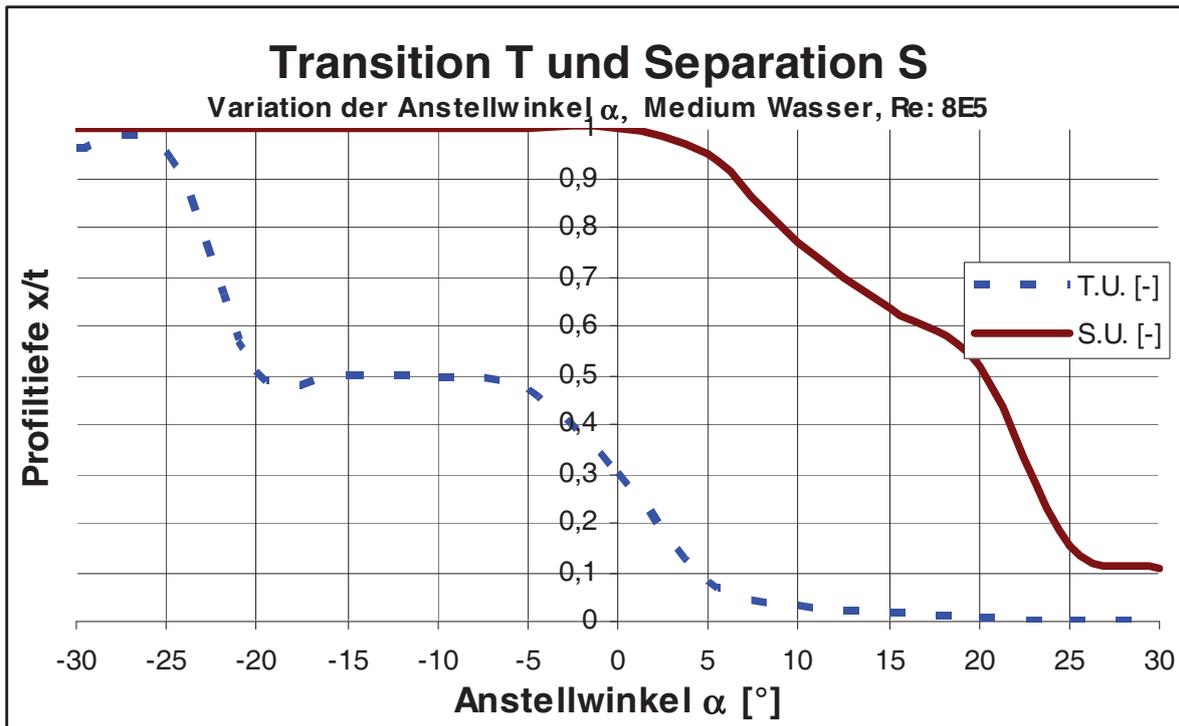












## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Die zu untersuchenden Geschwindigkeiten sollen bei unseren Betrachtungen nicht kleiner als  $v_{\min} = 0.5 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$  sein. Die Tiefe T des Tragflügels repräsentiert die signifikante Länge L in der Formulierung der Reynolds-Zahl und variiert im Bereich von  $\{0.1[\text{m}] < T < 0.3[\text{m}]\}$ ; die kinematische Viskosität<sup>12</sup> des Mediums ist mit  $\nu(\text{Wasser}) = 0,1012 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$  als Tabellenwert gegeben. Damit sind die minimalen und die maximalen errechneten Reynoldszahlen angegeben mit den Zahlenwerten  $Re_{\text{unten}} = 49.407$  und  $Re_{\text{oben}} = 975.296$ ; sie determinieren einen Untersuchungsbereich der relevanten Geschwindigkeiten von:

Geschwindigkeitsbereich:  $5 \cdot 10^4 < Re < 1 \cdot 10^6$

Medium	Wasser, 20 [°C]
Dichte	$0,998 \cdot 10^3 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
Dyn. Viskosität	$0,1012 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
Schallgeschwindigkeit	1484 $\text{[m}\cdot\text{s}^{-1}]$

CHORD-Länge	x	[m]	
Lokale Reynolds-Zahl	$Re_x$	[-]	$Re_x = Re_{\delta_2} = v_{\infty} \cdot x / \nu$
Verdrängungsdicke, Grenzschichtdicke <sup>13</sup>	$\delta_1$	[m]	
Grenzschichtdicke (laminar) <sup>14</sup>	$\delta_2 = \delta_{\text{LAM}}$	[m]	$\delta_{\text{LAM}} = 5,0 \cdot (Re_x)^{-1/2} \sim x^{1/2}$
Grenzschichtdicke (turbulent) <sup>15</sup>	$\delta_3 = \delta_{\text{TURB.}}$	[m]	$\delta_{\text{TURB.}} = k(x) \cdot (Re_x)^{-1/2} \sim x^{0.8}$
Konturbeiwert (shape factor12)	$H_{12}$	[-]	$H_{12} = \delta_1 / \delta_2$
Konturbeiwert (shape factor32)	$H_{32}$	[-]	$H_{32} = \delta_3 / \delta_2$

T.L. oder $ULT_{\text{LOWER}}$	Umschlagpunkt, Transition: laminar-turbulent, lower surface
T.U. oder $ULT_{\text{UPPER}}$	Umschlagpunkt, Transition: laminar-turbulent, upper surface
S.L. oder $ABP_{\text{LOWER}}$	Ablösepunkt, Separation, lower surface
S.U. oder $ABP_{\text{UPPER}}$	Ablösepunkt, Separation, upper surface

<sup>12</sup> Stoffgrößen einiger Strömungsmedien

Stoff	dyn. Viskosität $\eta$	Dichte $\rho$	kin. Viskosität $\nu$	Schallgeschw. a
[phys. Einheit]	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
Luft <sub>1</sub>	$18,1 \cdot 10^{-6}$	1,188	$15,24 \cdot 10^{-6}$	343
Wasser <sub>2</sub>	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$0,998 \cdot 10^3$	$0,1012 \cdot 10^{-6}$	1484
Öl <sub>3</sub>	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$0,858 \cdot 10^3$	$7,93 \cdot 10^{-6}$	1340
Gelatine <sub>4</sub>	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^3$	$4,625 \cdot 10^{-6}$	k. A.

<sup>13</sup> Grenzschichtdicke (displacement thickness)  $\delta_1$

<sup>14</sup> auch Impulsverlustdicke (momentum loss thickness)

<sup>15</sup> Dicke der turbulenten Grenzschicht (ebene Platte)  $\delta_{\text{TURB.}} = k(x) (Re_x)^{-1/2}$ . Der empirische Faktor k entspricht der Ordinate  $k=y(x)$ , im Falle der ebenen Platte. Auch EnergieDickenbeiwert (energy loss thickness)

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Re: 1E4

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,376	0,82698	0,224	1	0,003	1	0,006
-25	-1,476	0,51354	0,19	1	0,005	1	0,008
-20	-1,376	0,34627	0,154	0,538	0,011	1	0,022
-15	-1,096	0,19622	0,114	0,515	0,033	0,575	0,045
-10	-0,694	0,11592	0,072	0,506	0,048	0,527	0,065
-5	-0,195	0,0863	0,029	0,5	0,308	0,518	0,322
0	0,05	0,06685	-0,017	0,498	0,313	0,513	0,33
5	0,384	0,07767	-0,058	0,328	0,32	0,555	0,925
10	0,795	0,11719	-0,104	0,052	0,512	0,083	0,538
15	1,201	0,1986	-0,142	0,026	0,526	0,037	0,988
20	1,454	0,3448	-0,179	0,012	0,982	0,023	0,983
25	1,534	0,57499	-0,211	0,004	0,982	0,007	0,984
30	1,412	0,91052	-0,24	0,003	0,984	0,005	0,986

Re: 2E5

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,358	0,32169	0,23	1	0,003	1	0,059
-25	-1,451	0,22489	0,197	0,964	0,005	1	0,085
-20	-1,377	0,14682	0,162	0,532	0,009	1	0,196
-15	-1,332	0,07415	0,105	0,511	0,029	1	0,585
-10	-0,932	0,0508	0,059	0,5	0,045	1	0,686
-5	-0,474	0,03351	0,014	0,494	0,197	1	0,844
0	0,014	0,02162	-0,017	0,489	0,307	0,95	0,984
5	0,594	0,02541	-0,045	0,22	0,314	0,87	0,989
10	1,037	0,04361	-0,09	0,047	0,334	0,689	0,993
15	1,418	0,07067	-0,134	0,024	0,518	0,579	0,994
20	1,451	0,14514	-0,187	0,01	0,934	0,18	0,989
25	1,508	0,22771	-0,217	0,004	0,982	0,08	0,984
30	1,393	0,32176	-0,245	0,003	0,983	0,058	0,986

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Re: 4E5

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,362	0,28227	0,232	0,965	0,003	1	0,08
-25	-1,458	0,196	0,199	0,959	0,004	1	0,119
-20	-1,445	0,12399	0,162	0,52	0,006	1	0,327
-15	-1,361	0,06529	0,103	0,504	0,023	1	0,614
-10	-0,96	0,04432	0,056	0,495	0,041	1	0,717
-5	-0,508	0,03005	0,011	0,491	0,173	1	0,893
0	0,05	0,02664	-0,017	0,317	0,304	1	0,986
5	0,614	0,02375	-0,044	0,122	0,309	0,9	0,99
10	1,078	0,03757	-0,086	0,04	0,321	0,737	0,994
15	1,452	0,06141	-0,131	0,021	0,509	0,612	0,995
20	1,526	0,12045	-0,186	0,005	0,537	0,335	0,994
25	1,515	0,20516	-0,219	0,003	0,98	0,118	0,986
30	1,398	0,29157	-0,248	0,003	0,983	0,085	0,987

Re: 6E5

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,365	0,2683	0,233	0,962	0,003	1	0,093
-25	-1,468	0,1844	0,2	0,958	0,003	1	0,15
-20	-1,452	0,11561	0,161	0,514	0,005	1	0,337
-15	-1,372	0,06153	0,102	0,5	0,019	1	0,624
-10	-0,977	0,041	0,055	0,494	0,04	1	0,736
-5	-0,511	0,02938	0,011	0,481	0,101	1	0,898
0	0,05	0,02533	-0,017	0,308	0,301	1	0,987
5	0,626	0,02325	-0,043	0,098	0,306	0,918	0,991
10	1,09	0,03527	-0,085	0,036	0,315	0,75	0,994
15	1,469	0,05696	-0,13	0,018	0,505	0,628	0,995
20	1,656	0,10081	-0,176	0,005	0,525	0,507	0,995
25	1,522	0,19062	-0,221	0,003	0,939	0,141	0,993
30	1,401	0,26816	-0,249	0,002	0,982	0,098	0,987

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Re: 8E5

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,367	0,25534	0,234	0,961	0,002	1	0,101
-25	-1,475	0,17877	0,201	0,956	0,003	1	0,168
-20	-1,592	0,09778	0,151	0,509	0,005	1	0,515
-15	-1,38	0,05865	0,101	0,498	0,016	1	0,631
-10	-0,992	0,03861	0,053	0,492	0,038	1	0,754
-5	-0,517	0,02865	0,011	0,474	0,082	1	0,907
0	0,05	0,02448	-0,017	0,302	0,299	1	0,987
5	0,646	0,02337	-0,041	0,082	0,304	0,947	0,991
10	1,105	0,03313	-0,083	0,032	0,311	0,768	0,994
15	1,475	0,05497	-0,129	0,015	0,502	0,634	0,995
20	1,666	0,09543	-0,175	0,004	0,517	0,516	0,995
25	1,527	0,1816	-0,221	0,002	0,931	0,155	0,994
30	1,404	0,25424	-0,249	0,002	0,98	0,106	0,988

Re: 1E6

$\alpha$ [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]
-30	-1,369	0,24687	0,234	0,959	0,002	1	0,108
-25	-1,481	0,17291	0,202	0,541	0,003	1	0,182
-20	-1,6	0,09327	0,15	0,506	0,004	1	0,522
-15	-1,389	0,05651	0,1	0,497	0,014	1	0,64
-10	-1,004	0,03697	0,052	0,491	0,037	1	0,768
-5	-0,521	0,03016	0,01	0,328	0,066	1	0,913
0	0,05	0,02405	-0,017	0,299	0,299	1	0,988
5	0,647	0,02304	-0,041	0,073	0,303	0,948	0,992
10	1,117	0,03179	-0,082	0,029	0,309	0,781	0,994
15	1,483	0,05358	-0,128	0,012	0,498	0,642	0,995
20	1,674	0,09113	-0,175	0,004	0,512	0,523	0,995
25	1,534	0,17527	-0,222	0,002	0,926	0,171	0,994
30	1,405	0,24696	-0,25	0,001	0,98	0,112	0,988

## **Anhang: Technische Beschreibung**

(GM301) DE 20 2013 004 881.6 IPC: F03D 1/06

### **Fluiddynamisch wirksames Strömungsprofil aus geometrischen Grundfiguren**

Die Erfindung betrifft ein fluidmechanisch wirksames, symmetrisches Strömungsprofil, dessen Kontur mit geringen deklarativen Mitteln beschreiben werden kann. Der Erfindung liegt die Idee eines Strömungsprofils zu Grunde, das durch die geometrischen Elemente Ellipse, Kreis und Tangente beschrieben und durch lediglich zwei Parameter eindeutig definiert ist. Das Strömungsprofil ist für Kraft- und Arbeitstragflächen an Fahrzeugen und für Anwendungen in Strömungsmaschinen geeignet. Ausprägungen und Varianten des fluidmechanisch wirksamen Strömungsprofils können in Serien systematisiert und geordnet werden. Das Strömungsprofil kann skaliert und parametrisiert werden derart, dass es für Anströmbedingungen fluidmechanisch wirksam und geeignet ist, die durch kleine Anströmgeschwindigkeiten und/oder kleine geometrische Bauteilabmessungen gekennzeichnet sind.

### **Stand der Technik und der Wissenschaft**

Das Strömungsprofil bezeichnet die Form eines Strömungskörpers in Strömungsrichtung des umgebenden Fluids. Die Kontur eines Strömungsprofils bezeichnet die umhüllende Gestalt des Strömungskörpers. Besonders konturiert sind Strömungsprofile für Krafttragflächen und Arbeitstragflächen. Durch die spezifische Form von Kraft- und Arbeitstragflächen und durch die Umströmung des Fluids

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

kommt es zu einem Wechselwirkungsgeschehen, das durch Energieaustausch gekennzeichnet ist.

Krafttragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die geeignet sind, dem bewegten umgebendem Fluid vornehmlich Energie zu entziehen. Beispiele sind die Repellertragflächen einer Windkraftanlage oder die Schaufeln einer Fließwasserkraftanlage.

Arbeitstragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die vornehmlich Energie in ein umgebendes Fluid einkoppeln. Beispiele sind die Leit- und Steuerflächen von Luft- und Seefahrzeugen, das Paddel eines Kanus oder Schaufeln von fluidmechanischen Antrieben.

Für Kraft- und Arbeitstragflächen nach Stand der Technik wird in der Regel eine mechanisch starrer Form, ein deklaratorisch definiertes Profile und eine nichtflexible Kontur angestrebt. Die Profile von Kraft- und Arbeitstragflächen nach Stand der Technik sind in der Regel entweder definiert symmetrisch oder definiert asymmetrisch.

Bei einfachen geometrischen Formen, etwa den Konturen von ebenen Plattenprofilen, bei Wölbplattenprofilen oder bei einfach gekröpften Knickplattenprofilen ist der Deklarationsaufwand gering. Eine geschlossene mathematische Beschreibung in Gestalt einfacher Formeln existiert. Bei manchen Profilformen vom Stand der Technik und vor dem Hintergrund hoher Präzisionsansprüche an das Konstruieren, das Fertigen von Kraft- und Arbeitstragflächen und für das Messen oder die mathematische Handhabung von Konturen von Profilen von Kraft- und Arbeitstragflächen ist der Deklarationsaufwand, der auch die mathematischen Interpolationsmodelle betrifft, teilweise erheblich. Es ist nach Stand der Technik und der Wissenschaft üblich, Koordinaten der Konturen von Strömungsprofilen sowie die zugehörigen mathematischen Handhabungsmethoden in Datenbanken zu hegen (siehe auch: The

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Airfoil Investigation Database, [W-2] und UIUC Airfoil Coordinates Database [W-3]).

Nach Stand der Wissenschaft und Technik ist es außerdem üblich, den Strömungszustand um ein Strömungsbauteil über die Reynolds-Similarität zu beschreiben. Als "klein" sollen in dem hier beschriebenen Zusammenhang Anströmgeschwindigkeiten und/oder geometrische Bauteilabmessungen gelten, die einen Bereich von Reynolds-Zahlen  $\{Re < 5000\}$  determinieren.

Gestaltungsstrategien zur Strömungskontrolle entlang der Kontur eines Profils in einem Bereich kleiner Reynolds-Zahlen können den Ort des Umschlagpunktes von laminarer in turbulente Strömung betreffen.

(1) Gestaltungsstrategien für den frühen Umschlag von laminarer in turbulente Strömung zielen auf Robustheit der Profile gegenüber Störungen und unterschiedliche Strömungsbedingungen an der Profilkontur. Für kleine Reynolds-Zahlen werden nach Stand der Technik geringe Profildicken und hohe Profilwölbungen (bei nicht symmetrische Profile) verwendet. Dünne Profile besitzen hier geringere Übergangsgeschwindigkeiten und somit einen kleineren Druckanstieg. Der sich ergebende kleine Nasenradius sorgt für die Ausbildung einer Saugspitze an der Profilnase und dem frühen Umschlag der Grenzschicht in den turbulenten Zustand. Die turbulente Grenzschicht kann dann den Druckanstieg im hinteren Profilbereich besser bewältigen [W-1].

(2) Gestaltungsstrategien für den späten (weit hinten liegenden) Umschlag von laminarer in turbulente Strömung zielen auf Profile mit hoher fluidmechanischer Wirksamkeit. Derartige Profile sind weniger robust. Die laminare Lauflänge determiniert den Abstand zwischen Vorderkante des Profils und dem laminar/turbulenten Umschlagspunkt der Strömung. Die "Laminarprofile" genannten Profile nach Stand der

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Technik weisen in der Regel gegenüber Profilen mit turbulenten Grenzschichten eine geringere Wandreibung auf. Dies gilt insbesondere im Bereich kleiner Reynolds-Zahlen. Bei Kraft- und Arbeitstragflächen wird auf Profilkonturen zurückgegriffen, die formbedingt hohe laminare Lauflängen aufweisen, um geringe Strömungswiderstände zu erreichen. Die Verlängerung der laminaren Lauflänge (der laminaren Grenzschicht) wird durch eine besondere Formgebung der Profilkontur erreicht, bei der der Umschlag in eine turbulente Grenzschichtströmung möglichst lange hinausgezögert wird [W-1].

Die Grundbeschreibung eines Strömungsprofils nach Stand der Technik erfolgt mit wenigstens den vier geometrischen Größen Tiefe  $t$  [m], Dicke  $d$ [m], Wölbung  $f$ [m] und Wölbungsrücklage  $x_f$ [m]. Als generalisierte, auf die Profiltiefe  $t$ , bezogene Größen folgen somit die (spezifische) Profildicke  $d/t$  [%], die (spezifische) Profilwölbung  $f/t$  [%], und die (spezifische) Wölbungsrücklage  $x_f/t$  [%] (siehe auch Tabelle 2).

### **Problembeschreibung**

Bei der Entwicklung von fluidmechanisch wirksamen Kraft- und Arbeitstragflächen für Strömungsmaschinen werden die Koordinaten der Konturen der Strömungsprofile Profilkatalogen entnommen. Dies stellt im Zeitalter hoch entwickelter mathematischer Berechnungs- und Handhabungsmethoden und vergleichsweise leicht verfügbarer Datenbankbestände kein Problem dar. Dennoch taucht in für Strömungsanwendungen typischen Entwicklungs- und Nutzungsszenarien, etwa in Forschungs-labors (Prototypenbau) und im von kleinen und mittelständigen Unternehmen geprägten Yacht- und Bootsbau (Einzelanfertigungen, Unikate, Reparatur) häufig das Problem auf, dass die Geometriedaten der Konturen von Profilen für fluidmechanisch wirksame Kraft- und Arbeitstragflächen oder für Profillehren, Formen und

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

anderer Fertigungsmittel in einer für die Bauteiloptimierung und/oder die Fertigung nicht geeigneten Form vorliegen. Für die Beschreibung von Konturen nach dem Stand der Technik wird auf Datenbanken oder Profiltabellen zurückgegriffen [Abbo-59] [Eppl-90] [Gorr-17][W-2][W-3]. Dass einfache mathematische Beschreibungen der Profilkontur nur für ebene Plattenprofile und andere sehr einfache Profile existiert und es nach Stand der Technik und der Wissenschaft üblich ist, Koordinaten der Konturen von Strömungsprofilen in Datenbanken zu hegen, führt in der Labor-, Reparatur in der Boots- und Yachtbaupraxis dazu, dass durch Konstruktion und gestalterische Vorgabe vorgesehene Profile nur unzureichend in Formen und in Bauteilkonturen wiedergegeben werden können. Für viele nichttriviale Konturen fluidmechanisch hochwirksamer Profile, insbesondere für Laminarprofile und für Konturen bauchiger Profile für einen Einsatz im Reynolds-Bereich  $\{Re < 5000\}$  ist eine einfache Beschreibung nicht gegeben.

### Problemlösung

Die Erfindung betrifft ein fluidmechanisch wirksames, symmetrisches Strömungsprofil, dessen Kontur durch die geometrischen Elemente Ellipse, Kreis und Tangente beschrieben und durch zwei Parameter  $[p1][p2]$  vollständig und eindeutig definiert ist, wie folgt:

"*PROFILKONTUR*  $[p1][p2]$ ". Mit den Parametern:  $p1$  sei die spezifische Profildicke  $d/t$  [%] und  $p2$  sei die spezifische Wölbungsrücklage  $xf/t$  [%] (bzw. die spezifische Dickenrücklage  $xd/t$  [%] bei einem symmetrischen Profil). Das Strömungsprofil "*PROFILKONTUR*  $[p1][p2]$ " ist für Kraft- und Arbeitstragflächen und die Anwendung in Strömungsmaschinen geeignet. Ausprägungen und Varianten des fluidmechanisch wirksames Strömungsprofils können in einer Serie systematisiert und geordnet werden. Das Strömungsprofil kann skaliert und parametrisiert werden

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

derart, dass es besonders für Anströmbedingungen fluidmechanisch wirksam und geeignet ist, die durch kleine Anströmgeschwindigkeiten und/oder kleine geometrische Bauteilabmessungen gekennzeichnet sind und einen Bereich von Reynolds-Zahlen  $\{Re < 5000\}$  determinieren.

In einer entsprechenden Parametrisierung  $\{ (d/t) > 10 [\%] \text{ und } (x_f/t) > 50[\%] \}$  stellt die Kontur ein Laminarprofil (nach Gestaltungskonzept (2), siehe oben) dar. Für ein symmetrisches Laminarprofil mit einer spezifischen Dicke von  $d/t=20[\%]$  und einer spezifischen Dickenrücklage  $x_d/t=75[\%]$  ergibt sich beispielsweise eine Profilkennung: "*PROFILKONTUR [20][75]*", oder kurz: "*PROFILKONTUR 2075*".

### Erzielbare Vorteile

Mit einem fluidmechanisch wirksamen, symmetrischen Strömungsprofil, dessen Kontur durch die geometrischen Elemente Ellipse, Kreis und Tangente beschrieben wird und diese Kontur durch zwei Parameter vollständig und eindeutig definiert ist wird erreicht, dass

- (1) in der Baupraxis, in der Reparatur- und Instandhaltungspraxis Strömungsbauteile und/oder deren Fertigungsmittel wie Profillehren oder Formen durch einfache mathematische Beziehungen (Ellipsengleichung, Kreisgleichung und Satz von Thales) beschrieben werden können und
- (2) in der Konstruktionspraxis geometrische Vorgaben möglich werden oder existieren, die auch vom Laien mit geringsten Mitteln umgesetzt werden können. Das kann für Kraft- und Arbeitsmaschinen für den Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern von Bedeutung sein.
- (3) Die Erfindung zur Simplifizierung der Konstruktion und zur Robustheit im Betrieb der Kraft- und Arbeitstragflächen mit derartigen Profilen und Profilkonturen beiträgt. Dies ist von wirtschaftlichem Interesse.

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Da selbst Laminarprofile mit der Determination beschreibbar werden, stellen Profile und Konturen gemäß der Erfindung eine Alternative für Kraft- und Arbeitstragflächen für Leit- und Steueraufgaben bei Seefahrzeugen oder in Strömungsmaschinen dar.

### **Aufbau und Konstruktion des Profils**

Die Kontur des Profils wird durch die geometrischen Elemente Ellipse, Kreis und Tangente beschrieben und durch die zwei Parameter spezifische Profildicke  $d/t$  und spezifische Dickenrücklage  $xd/t$  (spezifische Wölbungsrücklage  $xf/t$  für den allgemeinen Fall) vollständig und eindeutig definiert (siehe Abbildung Figur 1).

Abbildung Figur 2 zeigt schematisch alle Teillinien der Profildefinition. Die Linien der Ellipse E, des oberen Kreissektors KSO, der oberen Tangente TO, der (singuläre) Punkt am Heck des Profils PH, die Linien der unteren Tangente TU und des unteren Kreissektors KSU bilden eine geometrische, organisatorische und funktionale Einheit, die als Kontur K das Profil definiert. Der Punkt am Bug des Profils PB ist Element der Kontur.

Abbildung Figur 1 zeigt das Profil schematisch in seinen semantischen Elemente Ellipse, Kreis und Tangente. Die Profilsehne ist die Symmetrieachse des Profils. Der (Kreis-) Radius R des Profils entspricht der halben Profildicke  $R = d/2$ . Die Profiltiefe ist gegeben mit t. Die Wölbungsrücklage  $xf$  markiert den Punkt entlang der Profilsehne, an der das Profil die größte Dicke erreicht. Abbildung Figur 3 zeigt schematisch mathematischen Zusammenhänge bei der Profilkonstruktion. Es ist sofort zu erkennen, dass Gesamtkonstruktion bei gegebener Profiltiefe  $t=a+c$  und damit die Definition des Profils nur von zwei Parametern, abhängt: der Profildicke  $d=2b$  und der Wölbungsrücklage  $a=t-c$ . Siehe

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

hierzu die schematische Darstellung, Figur 5. Aus den schematischen Darstellungen der Abbildungen Figur 1 und Figur 2 und Figur 3 ergeben sich alle Beziehungen, die zu einer Konstruktion des Profils notwendig sind.

**Teilkonstruktion Ellipse:** Für Punkte  $P(x,y)$  die Element der Ellipse  $E$  sind, gilt die Ellipsengleichung  $(x^2/a^2)+(y^2/b^2) = 1$ . Siehe schematische Skizze in Abbildung Figur 1 und Figur 2.

**Teilkonstruktion Kreis:** Für Punkte  $P(x,y)$  die Element des Kreises  $K$  sind, gilt die Kreisgleichung  $x^2+y^2 = R^2$ . Siehe schematische Skizze in Abbildung Figur 1 und Figur 2. Markante Punkte der Profilkonstruktion sind der Bugpunkt des Profils  $PB=P(x=0,y=0)$ , der Verbindungspunkt von Ellipse und Kreis:  $P1O=P(a,R)$  für die Profiloberseite, der Verbindungspunkt von Ellipse und Kreis:  $P1U=P(a,-R)$  für die Profilunterseite, der Verbindungs-punkt von Kreis und Tangente  $P2O=P(x_B,y_B)$  für die Profiloberseite, der Verbindungspunkt von Kreis und Tangente  $P2U=P(x_B,-y_B)$  für die Profilunterseite und der Heckpunkt des Profils  $PH=P(x=a+c,y=0)=P(t,0)$ .

**Teilkonstruktion Tangente:** In der schematischen Skizze, Abbildung 4 ist die Anwendung des Satzes von Thales auf die Teilkonstruktion Tangente dargestellt. Für Punkte  $P(x,y)$  die Element der oberen Tangente  $TO$  und der unteren Tangente  $TU$  sind, gilt die Tangentengleichung:  $(x_B-x_Z)(x-x_Z)+(y_B-y_Z)(y-y_Z) = R^2$ . Der Punkt  $Z$  ist das Zentrum des Kreises und der Ellipse  $Z=P(x_Z,y_Z)=P(a,0)$ .

Damit ist das Profil definiert.

### Wirkungsweise

Für die Beschreibung der Wirkungsweise eines fluidmechanisch wirksamen (symmetrischen) Strömungsprofils werden in der Regel und nach Stand der Technik Messkanaluntersuchungen an Tragflügeln unter genau definierten Bedingungen angestellt. Aufgrund der vergleichsweise ausreichend hohen Genauigkeit sind numerische Strömungssimulationsverfahren nach Stand der Technik und Wissenschaft üblich. In der Analysepraxis sind Berechnungs- und Simulationsverfahren die Strömungsprofile und zweidimensionale Sektorenschnitte eines Tragflügels nach der Potentialtheorie den untersuchen, von großer Aussagekraft. Für die Darstellung der physikalischen Wirksamkeit und Wirkungsweise wurde ein Programmsystem vom Stand der Technik verwendet [Mial-05].

Für eine "*PROFILKONTUR*[p1][p2]" mit den Parametern spezifische Profildicke  $p1=d/t=20[\%]$  und Wölbungsrücklage  $p2=xf/t=75[\%]$  (bzw. Dickenrücklage:  $p2=xd/t=75[\%]$  für den symmetrischen fall) werden mit einem Berechnungsansatz nach der Potentialtheorie Auftrieb- und Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit vom Anstellwinkel in einer Strömung  $\alpha[^\circ]$  errechnet. Die Reynoldszahl des Strömungszustands ist  $Re=1000$ . Die Simulationsrechnung bezieht sich auf eine Anströmrichtung, die im Fall der Anströmung unter einem Anstellwinkel von  $\alpha=0[^\circ]$  genau der Symmetrieachse des Profils folgt (siehe schematische Abbildung in Figur 2) und das Profil vom Bugpunkt PB über die Kontur bis zum Heckpunkt PH umströmt. Positive und negative Anstellwinkel betreffen die Neigung der Symmetrieachse zur Hauptströmungsrichtung. Die Berechnungswerte der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte des Profils *PROFILKONTUR2075* und eines Referenzprofils (NACA 67-020 aus der 6-stelligen NACA-Reihe) sind in

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Tabelle 1 für eine Reihe von Anstellwinkeln wiedergegeben. Das Diagramm 1 zeigt den berechneten Verlauf der Auftriebsbeiwerte in Abhängigkeit von den Widerstandsbeiwerten (Polardiagramm) des Profils *PROFILKONTUR2075*. Berechnungswerte und Kurvenverlauf stellen den erwarteten Charakter eines (gutmütigen) bauchigen Profils dar.

Die Absolutwerte der berechneten Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte eines Profils sind in der theoretischen Strömungsanalyse nicht unbedingt entscheidend. Der Vergleich zweier mit den gleichen Methoden analysierter Profilkonturen ist aussagekräftiger. Das Referenzprofil NACA 67-020 stammt aus der 6-stelligen Reihe der NACA-Profilserie, die in der Praxis der Auftriebstragflächenkonstruktion für hydrodynamisch wirksame Leit- und Steuerflächen von Seefahrzeugen häufig verwendet wird. NACA 67-020 ist ein typisches Laminarprofil.

Im Diagramm 2 werden die berechneten Kurven der Auftriebsbeiwerte in Abhängigkeit vom Anstellwinkel des Profils *PROFILKONTUR2075* denen des Referenzprofils NACA 67-020 gegenübergestellt. Während die Auftriebsbeiwerte des Profils *PROFILKONTUR2075* bei einem Anstellwinkel von etwa  $18^\circ$  ihr Maximum erreichen, geht beim Profil NACA 67-020 der Bereich Auftrieb generierender Betriebspunkte über einen Anstellwinkel von  $\alpha=20^\circ$  hinaus. Der Anstieg der Kurven der Auftriebsbeiwerte beider Profile ist im Bereich der Anstellwinkel bis  $\alpha=12^\circ$  vergleichbar. Bis etwa  $\alpha=17^\circ$  sind die Auftriebsbeiwerte des Profils *PROFILKONTUR2075* besser.

# Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

Tabelle 1					
Auftriebsbeiwerte $C_a$ [-] und Widerstandsbeiwerte $C_w$ [-] über den Anstellwinkel $\alpha$ [°] für $Re: 10E3$ (Potentialtheoretische Berechnung)					
<i>KONTUR 20 75</i>			<i>NACA 67-020</i>		
$\alpha$ [°]	$C_a$ [-]	$C_w$ [-]	$\alpha$ [°]	$C_a$ [-]	$C_w$ [-]
0,0	0,014	0,18561	0,0	-0,000	0,20919
1,0	0,141	0,18658	1,0	0,127	0,21029
2,0	0,050	0,18643	2,0	0,066	0,21175
3,0	0,170	0,18887	3,0	0,179	0,21476
4,0	0,326	0,13849	4,0	0,294	0,21990
5,0	0,341	0,14992	5,0	0,316	0,16577
6,0	0,446	0,15516	6,0	0,432	0,17701
7,0	0,549	0,16468	7,0	0,521	0,19593
8,0	0,640	0,18300	8,0	0,609	0,21717
9,0	0,724	0,20173	9,0	0,694	0,24521
10,0	0,803	0,23177	10,0	0,775	0,28989
11,0	0,878	0,26216	11,0	0,852	0,33003
12,0	0,944	0,30928	12,0	0,923	0,37227
13,0	1,004	0,36616	13,0	0,987	0,44521
14,0	1,055	0,41889	14,0	1,044	0,52208
15,0	1,096	0,50426	15,0	1,095	0,60208
16,0	1,129	0,57563	16,0	1,138	0,69027
17,0	1,152	0,68656	17,0	1,171	0,80730
18,0	1,165	0,77656	18,0	1,197	0,92813
19,0	1,170	0,91294	19,0	1,214	1,02311
20,0	1,167	1,03630	20,0	1,225	1,22496

## Reihenuntersuchung zu Profilkonturen

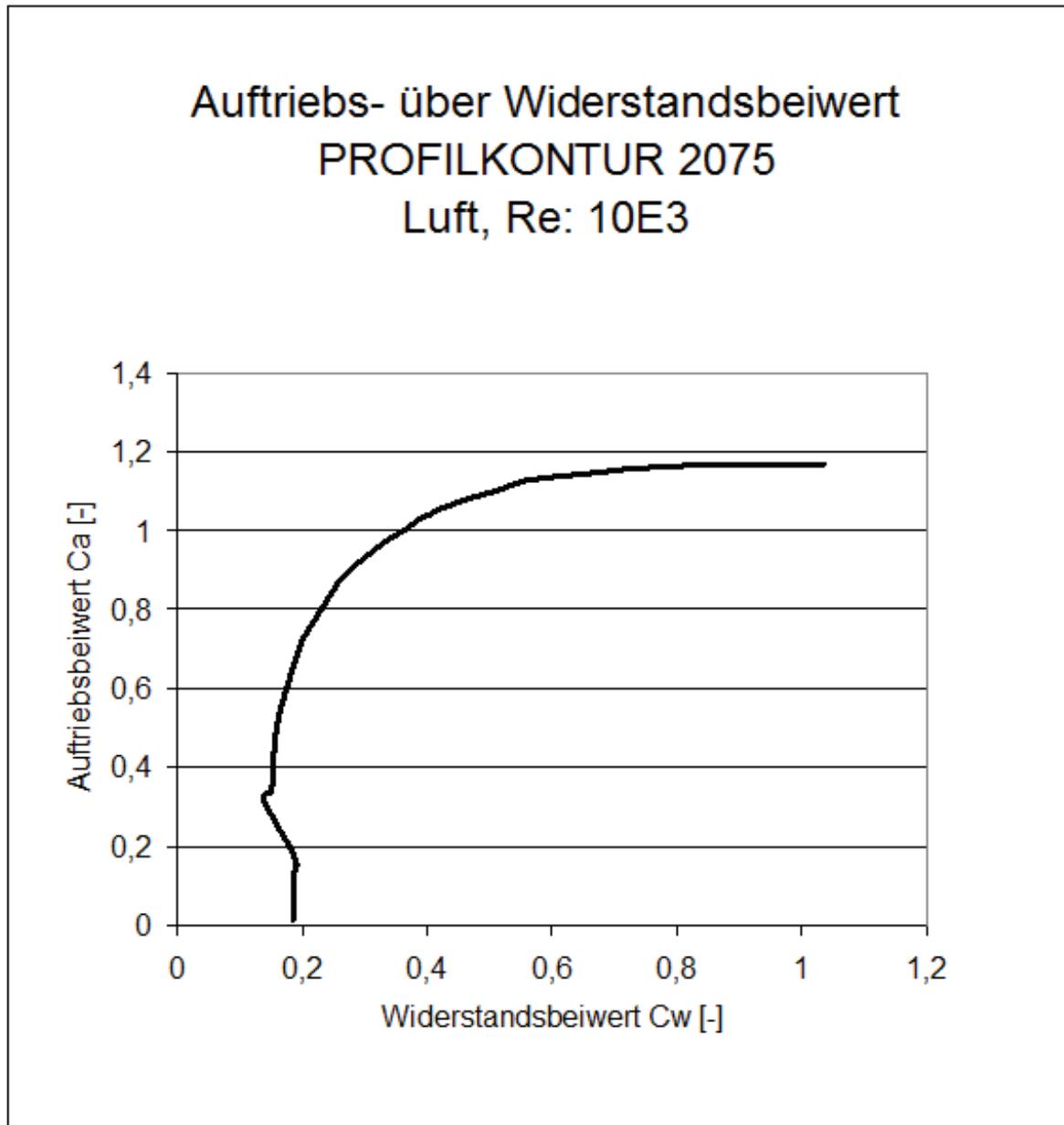
**Tabelle 2.: verwendete Größen, Formeln, Stoffwerte**

Profiltiefe	t	[m]
Profildicke	$d = 2R$	[m]
spezifische Profildicke	d/t	[%]
Profilwölbung	f	[m]
spezifische Profilwölbung	f/t	[%]
Wölbungsrücklage	xf	[m]
spez. Wölbungsrücklage	xf/t	[%]
Auftriebsbeiwert:	Ca	[-]
Widerstandsbeiwert:	Cw	[-]
Reynolds-Zahl	$Re = v \cdot L / \nu$	$[m \cdot s^{-1} / m^2 \cdot s^{-1}]$ ,
Re	$= v \cdot L / \nu$	
Dichte	$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho(\text{Luft})$	=1,188	
kinematische Zähigkeit	$\nu$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\nu(\text{Luft})$	=0,00001524	
Kreisgleichung:	$x^2 + y^2 = R^2$	
P(x,y):	bel. Punkt des Kreises	
Ellipsengleichung:	$(x^2/a^2) + (y^2/b^2) = 1$	
P(x,y):	bel. Punkt der Ellipse	
Tangentengleichung:	$(x_B - x_0)(x - x_0) + (y_B - y_0)(y - y_0) = R^2$	
P(x,y):	bel. Punkt der Tangente	

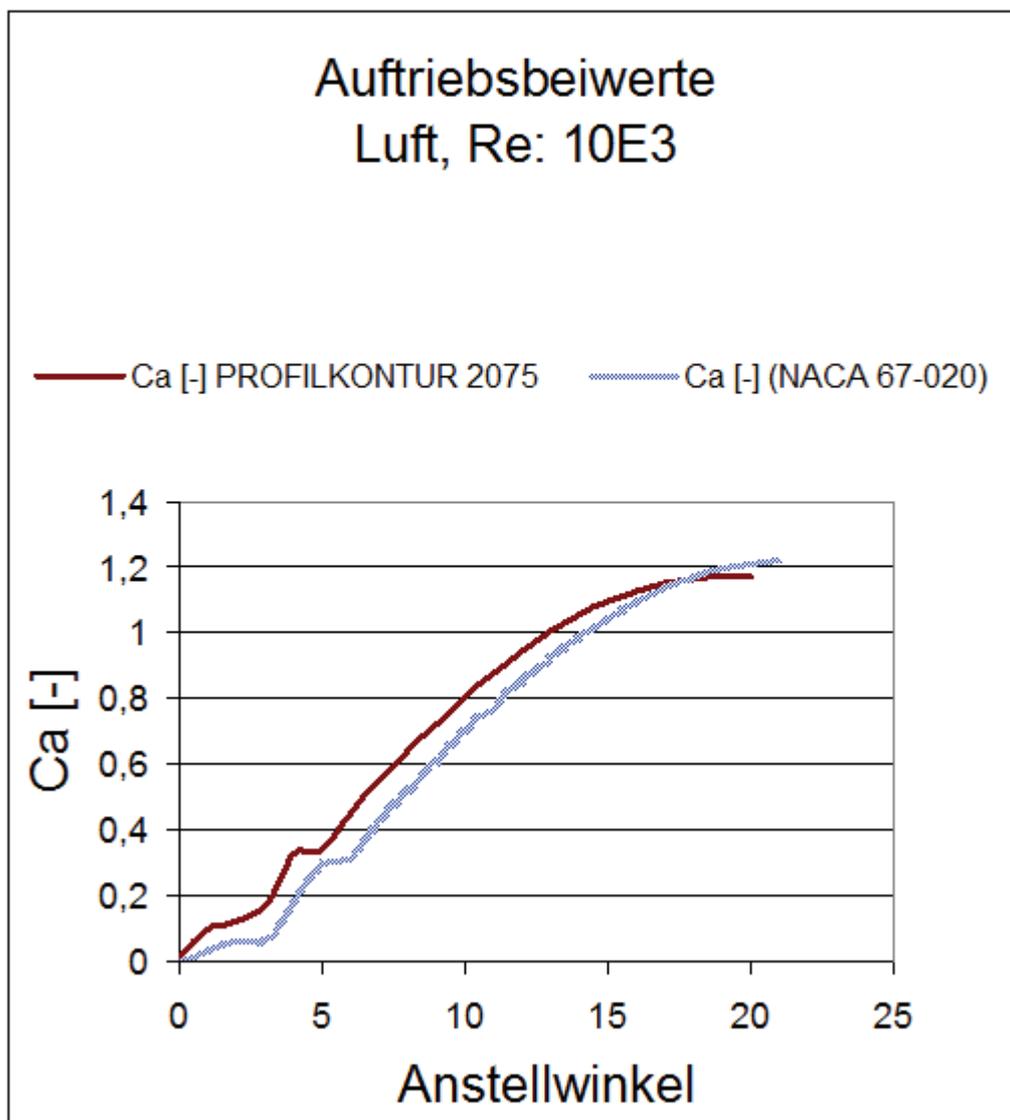
### Bibliographie und Quellen

- [Abbo-59] Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff: Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data. Dover Publications, New York 1959,
- [Epp1-90] Richard Eppler: Airfoil Design and Data. Springer, Berlin, New York 1990,
- [Gorr-17] Edgar Gorrell, S. Martin: Aerofoils and Aerofoil Structural Combinations. In: NACA Technical Report. Nr. 18, 1917.
- [Katz-01] Joseph Katz, Allen Plotkin: Low-Speed Aerodynamics (Cambridge Aerospace Series) Cambridge University Press; 2 edition (February 5, 2001)
- [Mial-05] B. Mialon, M. Hepperle: "Flying Wing Aerodynamics Studies at ONERA and DLR", CEAS/KATnet Conference on Key Aerodynamic Technologies, 20.-22. Juni 2005, Bremen.
- [W-1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Profil> (abgerufen 11032013)
- [W-2] The Airfoil Investigation Database,  
<http://www.worldofkrauss.com/foils/578> (abgerufen 11032013)
- [W-3] UIUC Airfoil Coordinates Database, (abgerufen 11032013)  
[http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html)

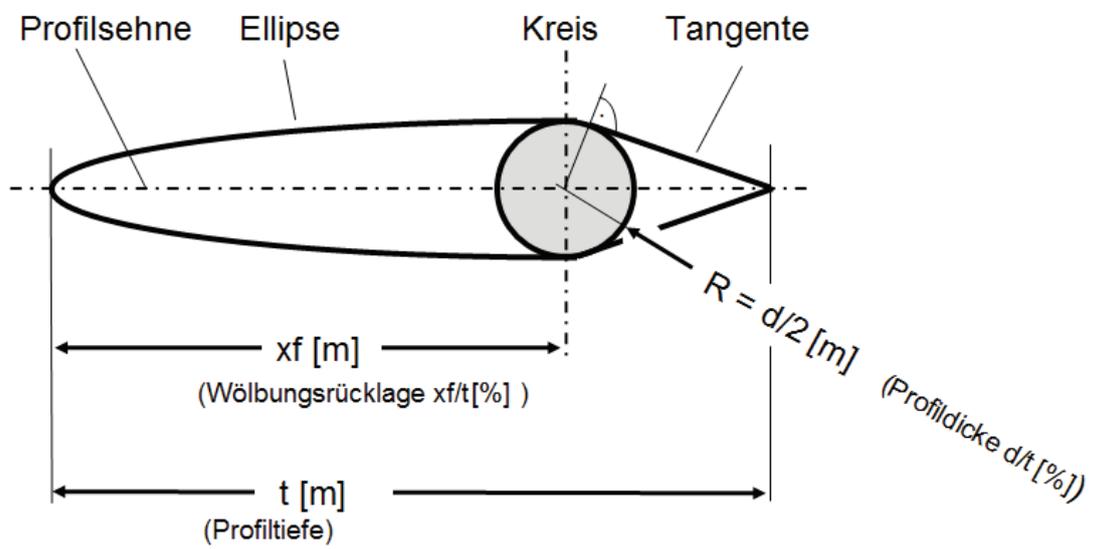
Diagramm 1



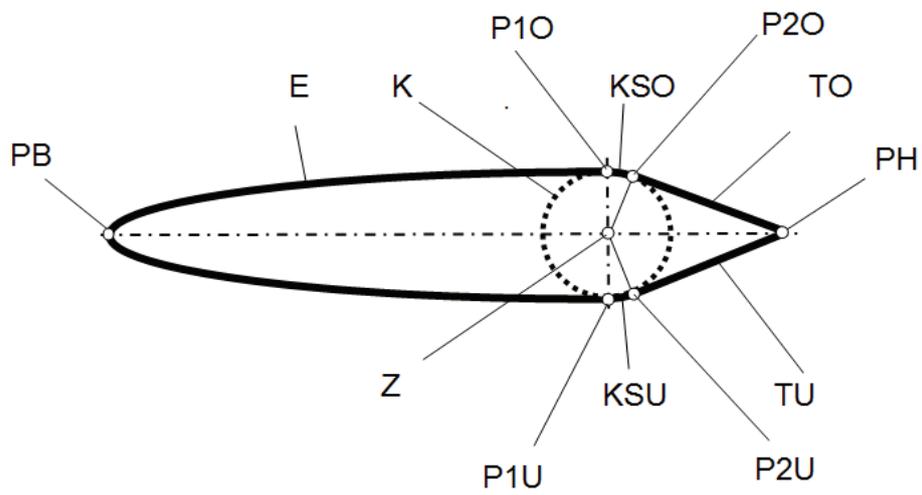
## Diagramm 2



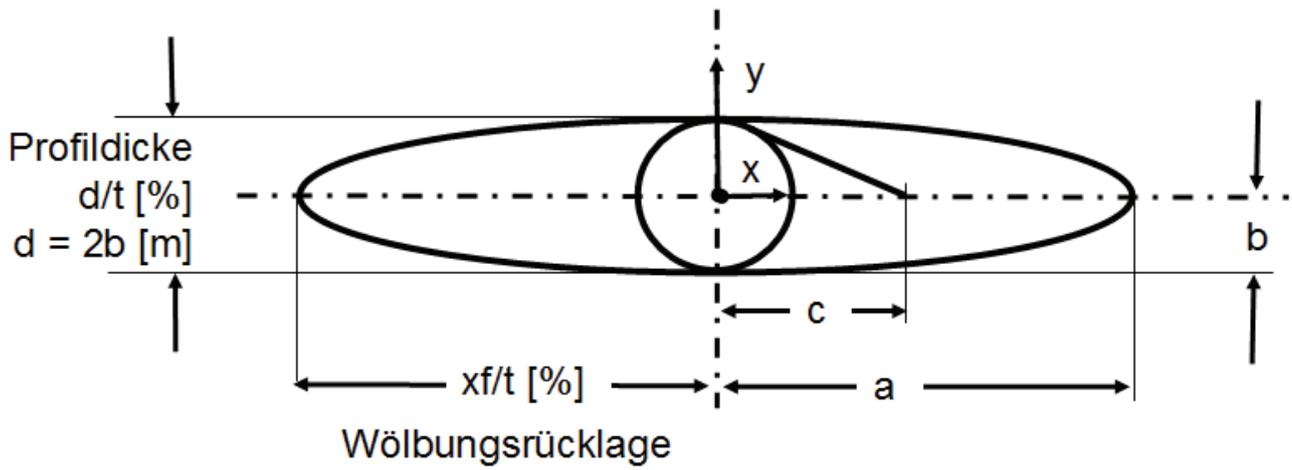
Figur 1



Figur 2

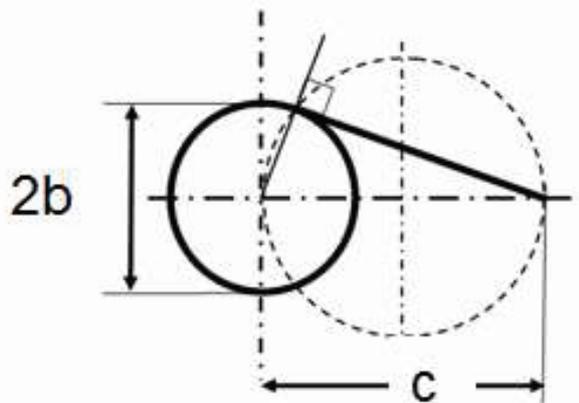


Figur 3

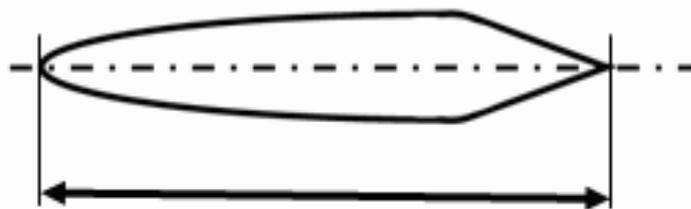


Figur 4

Satz v. Thales

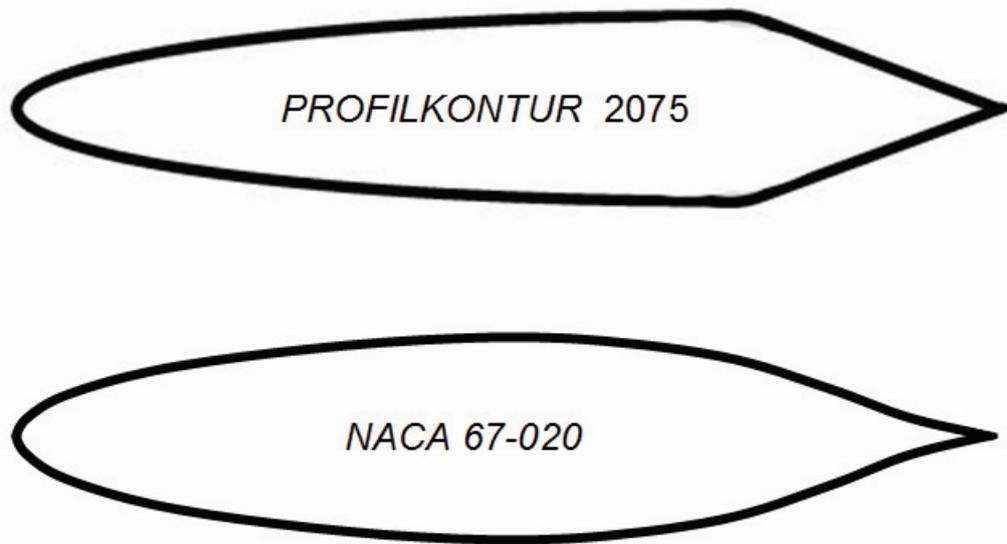


Figur 5

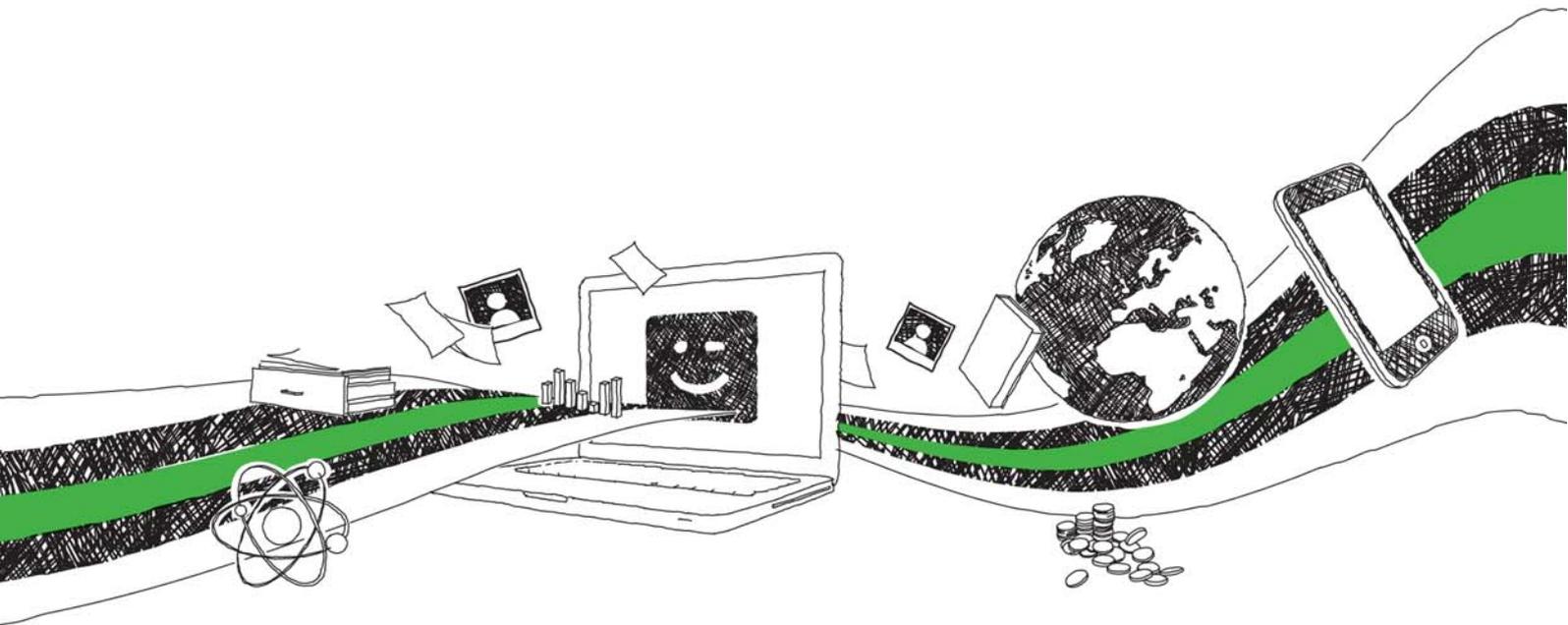


Profiltiefe  $t = a + c$  [m]

Figur 6



# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren

