

Michael Dienst

**Dossier über den Stand der Entwicklung
der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme**

**Intelligente Mechanik nach dem Vorbild der
Mittelhandknochen der Wirbeltiere**

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 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 © 2016 GRIN Verlag
ISBN: 9783668324923

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/343075>

Michael Dienst

Dossier über den Stand der Entwicklung der CARPO- Technologie für Rotationssysteme

**Intelligente Mechanik nach dem Vorbild der Mittelhandknochen der Wir-
beltiere**

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 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

Dossier über den Forschungsbedarf und den Stand der Entwicklung der CARPO- Technologie für Rotationssysteme

Mi. Dienst, Berlin im Sommer 2016

TITEL der Forschungslinie

CARPO.POC (Proofof Concept)

Lösungsprinzip, Konzept, Entwurf, Konstruktion, Prototyping und experimentelle Erprobung flexibler Tragflügel für Strömungsmaschinen nach dem Vorbild der Mittelhandknochen (Meta-Carpus) der Meeressäuger. Die Prinzipielle Lösung schließt numerische Analysen von Strukturkinematik und Strömung ein.

PRÄAMBEL

Wir sprechen von intelligenter Mechanik, wenn ein mechanisches System die Idee eines Manövers erkennt, sich passiv klug verformt und dann autonom dieses Manöver ausführt. Die Energie der Formänderung der Struktur stammt aus der Umgebung.

ADAPTION

How the PHYSICAL IMPACT shapes a bodies FUNCTION. Anpassungsphänomene in der belebten Natur können recht unterschiedlich sein. Fitness (engl. Fitness, Angepasstheit, Tauglichkeit) ist ein Fachbegriff aus der Populationsgenetik bzw. der Evolutionstheorie. Häufig benutzte Synonyme sind Anpassungs- bzw. Adaptationswert, relative Überlebensrate oder Eignung. Die Fitness betrachtet Anpassungsphänomene von Wesen in evolutionsrelevanten Zeiträumen: Leben oder Generationen von Leben. Die Fähigkeit eines Individuums zur Adaption bzw. Adaptation (von lat. adaptare', anpassen,

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

verändern) ist eine örtliche, lokale (Anpassungs-) Leistung der Transformation, des Gestaltwandels und/oder der Funktionsanpassung und sie ist zeitlich ad hoc. Die Anpassung (Adaptation) des biologischen Auges an die im Gesichtsfeld vorherrschenden Leuchtdichten, die Pflanzenbewegungen (Taxien, Nastien, Tropismen oder autonome Bewegungen) die der einzelnen Pflanze dazu dienen, den Lebensraum bestmöglich auszunutzen bzw. zu erschließen oder um Gefahren auszuweichen, sind populäre Beispiele der Funktionsanpassung durch Adaption. Adaptionsprozesse können sehr komplex sein, aber gleichzeitig einfache mechanische Funktionsursachen besitzen. So nutzen beispielsweise wandernden Fische (Lachsartige, Salmoniden) Wirbelstrukturen, um ihrer Umgebung bis zu 40% der zum Bergaufschwimmen erforderlichen Energie zu entziehen. Die mechanische Ursache sind so genannte „nichtorthodoxe Beaufschlagungs- Bewegungs- Regime, NOB“ der Flossenstrahlen, denen eine sehr einfache Konstruktion zu Grunde liegt. Wir Menschenwesen nutzen täglich die Parallelogramm-Formation des Fuß-Beine-Becken-Kollektivs um auf eine sehr elegante Weise (NOB) unseren Körperschwerpunkt in eine vorteilhafte Position zu verlagern, beispielsweise bei Ausgleichen eines abrupten Bremsvorgangs (negative Beschleunigung) im U-Bahnbetrieb. Autoadaptionsphänomenen ist gemein, dass die den Prozess antreibende Energie aus der Umgebung des Systems stammt und in sinnfälligen Beispielen die Reizrichtung des physikalischen Impact annimmt (orthodoxe Beaufschlagungs- Bewegungs-Regime). Beispiel ist der Fototropismus mancher Pflanzen (-blüten). Anders die Nastien (griech. nastos = festgedrückt) von Pflanzenorganen; sie werden von einem Außenfaktor ausgelöst, jedoch sind die Gestaltänderungen von der Struktur (physiologisch oder morphologisch, dorsiventral¹) der Organe festgelegt und nicht von der Reizrichtung. Nach kurzer Beaufschlagung kehrt die Pflanze von selbst wieder in die Ausgangslage zurück (Autonastie). Ein Beispiel für orthodoxe Autoadaption aus der Technik ist die Windfahne eines Windmühlen-Repellers. Bei Änderung der Beaufschlagungsrichtung der (das Windrad antreibenden) Strömung richtet die Windfahne das Windrad wieder in eine strömungsgünstige (ggf. die optimale) Position. Betrachte auch: die Horizontal-Sturmsicherung kleiner Windräder.

Konzepte der Autoadaption in der belebten und unbelebten Natur und in der Technik implizieren Transformation und Gestaltwandel und zielen auf eine Funktionsänderung. Erfolgt der Gestaltwandel nicht durch Wechsel einer Anordnung (z.B. ein Hebel wird ausgetauscht) sondern in der Struktur (z.B. die Verwölbung einer Funktionsfläche), treten Verschiebungen und Verzerrungen

¹ Lebewesen oder Teile davon sind dorsiventral, wenn sie nur eine einzige Symmetrieebene haben

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

des Körpers auf, deren Zustandsbeschreibungen sehr komplex sein können. Differentialkonstruktionen sind gut geeignet, Bauteile oder Baugruppen zu substituieren und dem Gesamtsystem eine Änderung der Funktion aufzuprägen. Integralkonstruktionen sind einer Substitution (eher) unzugänglich; die geforderte Transformationstauglichkeit muss ihnen inhärent sein. Fragen wir also nach der Beschaffenheit der Inhärenz der Gestaltwandelbarkeit. Adaptionsszenarien setzen eine formale Eignung des Systems zur Transformation, zum Gestaltwandel und zu einer Funktionsänderung voraus. In einem ersten Hub mag man vielleicht von einer „gewissen Flexibilität“ des Systems sprechen und damit die Elastizität einer Struktur meinen. Sicher bieten in bestimmten Fällen elastische Systeme Vorteile. So ist man beispielsweise dazu übergegangen die Blinker von Einzylinder-Enduro-Motorrädern generell auf elastischen Kunststoffpylonen „wackeln zu lassen“, statt sie wie früher mit immer massiveren Halteflanschen aus Stahl zu fixieren. Wenn wir als Gestalter die Kräfte in einer elastischen Konstruktion „spazieren führen“ wird uns die Fähigkeit der Struktur zum Gestaltwandel in einer sinnfälligen Weise sichtbar. Doch ist mit „Eignung zur Transformation“ genau dies auch gemeint? Eher nicht.

In der Biologie ist die Konstruktions-Morphologie² die Lehre von Struktur, Form, Formerzeugung und Funktionsweise der Organismen. Dort in der belebten Natur, setzt (Auto-) Adaption konstruktionsmorphologische Regime voraus; Organe beispielsweise, oder Gewebe. Erst diese sind einer funktionsmorphologischen Betrachtungsweise zugänglich, die nach und nach Erkenntnisse generiert, welche in die gesamt konstruktive Organismenbetrachtung der Konstruktionsmorphologie integriert werden (können). Ein sehr kluger Ansatz. Dass wir (deutschen) Ingenieure mit unseren „problemorientierten“³ Produktentwicklungsmethoden so erfolgreich sind und so gerne und mit einer gewissen Überheblichkeit auf unsere (englischsprachigen) Kollegen herabschauen, die „produktorientierte“⁴ Betrachtungsweisen bevorzugen, ist noch lange nicht überwunden und definitiv kein Konzept für eine (schöne) Zukunft. Das Festhalten, an einer (der einen als auch der anderen) Methodik mag daran liegen, dass uns selten Gestaltungsaufgaben gestellt werden, die von einer Maschine als einem WESEN, als einem transformationstauglichen, konstruktionsmorphologischen Regime ausgehen muss um ein Autoadaptionsphänomen zu materialisieren oder wenigstens das

² Die Konstruktions-Morphologie (von griechisch *μορφή*, *morphé* = Gestalt, Form und *λόγος*, *lógos* = Wort, Lehre, Vernunft).

³ Vergleiche: „Pahl & Beiz“ (Technische Universität Berlin, GER) in: Konstruktionslehre sowie die VDI-R 2221.

⁴ Vergleiche: „Michael French“ (University of Lancaster, UK) in: Design in Nature and Engineering.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Gestalten zu erleichtern. Dem Leser sei diesbezüglich das Kapitel METHODEN DES VORGEHENS in diesem Aufsatz empfohlen.

Gehen wir an dieser Stelle produktorientiert vor, also von außen nach innen gerichtet! Zunächst einmal ungeachtet von und neutral gegenüber einer komplexen Innenkonstruktion mit Gewebe, Sehnen, Knochen, Nerven und Gefäßen eines Tragflügelregimes sieht die konstruktionsmorphologische Sicht auf ein biologisches System die Kontur (eines Flügels) als eine Systemgrenze, die ein zu untersuchendes kompliziertes „Innenmilieu“ mit einer nicht minder komplexen äußeren „Umgebung“ (Environment) verbindet. Verbindet, nicht trennt! Man könnte auch sagen, die (aus der systemischen Sicht stammende) technische „System-Grenze“ wird in einer konstruktionsmorphologischen Betrachtungsweise durch eine „System-Kopplung“ ersetzt. Diese Systemkopplung ist real. Leider aber ist die Realität als solche nur in einem unglaublich geringen Maße von uns Menschen und selbst von unseren feinjustierten Apparaten und sensiblen Instrumenten überhaupt „wahrnehmbar“, weswegen man sinnvoller Weise besser von einer Wirklichkeit spricht. Wirklichkeit, im Sinne von Wechselwirklichkeit, ist einer Quantifizierung, wie wir sie gewohnt sind, zugänglich. Die „Strömungswirklichkeit“ einer fluidisch beaufschlagten Tragflügelfläche für die wir eine (inzwischen große) Schar von beschreibenden Größen und Parametern besitzen, ist Gegenstand zahlreicher zum Teil sehr unterschiedlicher Modellansätze, die mit dem Begriff des „Computational Fluid Dynamics, CFD überschrieben sind. In unseren weiteren Betrachtungen werden gitterbehaftete⁵ und so genannte gitterlose⁶ Verfahren der Systemmodellierung und Simulation auftauchen. Bei allen Unterschieden ist ihnen gemein, dass sie von einem kausalen Kern einer physikalischen Wechselwirkung (einer physikalischen Wechselwirklichkeit) ausgehen und uns Erkenntnisse liefern, die von genau jenen Tragflügeleigenschaften handeln, die wir untersuchen wollen. Welch ein Glück. Diese Erkenntnisse können treffend und genau, im Sinne von „nahe der Wirklichkeit“ oder auch weniger scharf sein. Die Zeit die wir für eine Berechnung der Strömungswirklichkeit zu investieren bereit sind, skaliert für die einen und für die anderen Verfahren um den „Faktor 1000“. Ob nun mathematisch genau und/oder numerisch unscharf, an der Systemkopplung von Innenmilieu und dem Environment des Tragflügels treffen wir eine physikalische Wechselwirklichkeit an: Die Systemkopplung ist wirklich. Und sie ist (mehr oder weniger exakt) quantifizierbar. Unsere eingangs gestellte Frage: „How the PHYSICAL IMPACT shapes a FUNCTION“ suggeriert eine bestimmte

⁵ Z.B. Finite Volumen Verfahren.

⁶ Z.B. die Potentialtheorie oder auch Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Richtung des Reizes, einen definierten Richtungssinn des physikalischen Impacts. Das ist nicht der Fall; was unsere Untersuchungen natürlich nicht einfacher macht. Vielmehr wirkt die Strömung auf die Tragfläche, ändert gegebenenfalls deren Form und die Tragfläche ihrerseits konditioniert die Strömung im Nachlauf des Flügels. Die Fluid-Struktur-Wechselwirkung an der Systemkopplung ist also zweiseitig. Mindestens, denn natürlich wissen wir inzwischen auch, dass die physikalische Wechselwirkung um einen Tragflügel Orte im Strömungsfeld erreicht, die geometrisch-zeitlich vor der Ebene der Tragfläche liegen (ähnlich dem „Riss im Wackelpudding“ der dem Messer vorausseilt – ausprobieren - oder die Welle vor dem Bug des Schiffes). Auch hier zwingt die konstruktions-morphologische Betrachtungs-weise zu einem Paradigmenwechsel, oder besser zu einem Paradigmenzuwachs. Während im Schiffbau beispielsweise die griffige Formel „Länge läuft“ aus der systemischen Sicht stammend, den Umstand beschreibt, dass der Bereich vorteilhafter Froudezahlen und damit die theoretische Rumpf-geschwindigkeit eines Seefahrzeugs mit zunehmender Konstruktionswasserlänge leichter erreicht wird, den Status eines Mythos erreicht, tut sich selbst das Yachtdesign derzeit schwer, die Formel „die Welle Bleibt im Schiff“ auch nur einer analytischen Würdigung zu unterziehen. Dabei sieht doch jedes Kind, dass der wellenmachende Marlboro-Man mit seinem Motorboot enorme Energie nutzlos in den See koppelt, während ein moderner Yachtrumpf genau dann optimal „läuft“ wenn er eine kleine benetzte Rumpfoberfläche besitzt und möglichst wenig in das Oberflächen-Wellengeschehen des Gewässers eingreift oder die „foilende Segeljolle“ mit der gleichen Geschwindigkeit des Motorbootes die Wasseroberfläche nahezu unberührt überfliegt.

GESTALTÄNDERUNGSPARADIGMATA

Das unten näher beschriebene CARPO-Prinzip „greift“ in seiner Variante ersten Grades den lokalen Grundmechanismus der sich unter mechanischer Last passiv verformenden Mittelhand der Wirbeltiere heraus und wendet ihn auf (gestalt-) morphologische⁷ Formänderungsaufgaben bei technischen Tragflügeln an. Die Getriebekinematik nach dem CARPO-Prinzip wird nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse zunächst nur an der Tragflügelwurzel verortet. Grundsätzlich kann das Gestaltungsprinzip an einer Tragfläche mehrmals auftauchen. Eine CARPO-Tragfläche ersten Grades besitzt begrenzte Möglichkeiten passiver Formänderung. Von einer Getriebekinematik nach dem CARPO-Prinzip können unterschiedliche Gestaltänderungsaufgaben gelöst werden.

⁷ Morphologie einer Konstruktion (aus griechisch *morphé*, Gestalt, Form), siehe oben Konstruktionsmorphologie.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Bisher haben wir drei Formänderungsaufgaben identifiziert, die wir mit den semantischen Paradigmata CANT, CURV und WRIS bedeuten.

CANT	ANWINKELN der Tragfläche und RELAXIEREN.
CURV	WÖLBEN der Tragfläche und RELAXIEREN.
WRIS	TORDIEREN der Tragfläche und RELAXIEREN.

Gestaltänderungsaufgaben und ihre Bedeutungen, die Gestaltänderungsparadigmata⁸ CANT, CURV und WRIS, können aus unterschiedlicher Richtung gestellt werden. Sie bestimmen das physikalische Wechselwirkungs-geschehen um das zu entwerfende Tragflügelsystem. Die zu einer Deformation erforderliche Gestaltänderungsenergie wird in die Struktur eingekoppelt oder der Struktur entnommen. Die Verformungsarbeit an der Struktur bleibt während der Beaufschlagung im System enthalten. Der physikalische Impact soll in den von uns in diesem Vorhaben betrachteten Fällen aus den Strömungskräften stammen, aus Fliehkräften und Corioliskräften⁹.

Aus einer (struktur-) energetisch niederen Ruhelage der Tragfläche kann die Struktur unter mechanischer Belastung in eine (fluidmechanisch) neutrale Verformungslage gezwungen werden und umgekehrt. Das CARPO-Gelenk in seiner Variante ersten Grades kann so angeordnet sein, dass es die Struktur beugt (A-Konfiguration, bend) oder streckt (V-Konfiguration, spin out). In der Regel ist die Gestaltänderungsaufgabe CANT im Wurzelbereich des Tragflügels die die Verformung einleitende Bewegung. Die Verformungsaufgaben:

CANT A2N: die Tragfläche steht in ihrer Ruhelage orthonormal auf einem Bezugssystem (z.B. einer Rotornabe). Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und zum Anwinkeln der Tragfläche (cant angle to neutral).

N2A: die Tragfläche ist in ihrer Ruhelage angewinkelt gegenüber einem Bezugssystem (z.B. einer Rotornabe). Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und zu einer senkrechten Anordnung der Tragfläche (neutral to cant angle).

⁸ Paradigma im Sinne einer grundsätzlichen (Gestaltungs-) Denkweise und semantisch als Bedeutung besitzend.

⁹ Die **Corioliskraft** ist eine Schein- oder Trägheitskraft, die einen bewegten Körper quer zu seiner Bewegungsrichtung ablenkt, wenn diese relativ zu einem rotierenden Bezugssystem beschrieben wird und nicht zu dessen Rotationsachse genau parallel liegt. Die Corioliskraft tritt nicht in Erscheinung, wenn die Bewegung aus Sicht eines nicht rotierenden Bezugssystems (z. B. eines Inertialsystems) beschrieben wird. Benutzt man zur Vereinfachung der Beschreibung rotierende Koordinatensysteme, treten für Bewegungen in diesen rotierenden Bezugssystemen auch Corioliskräfte auf.

Aus: <https://de.wikipedia.org/wiki/Corioliskraft>

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

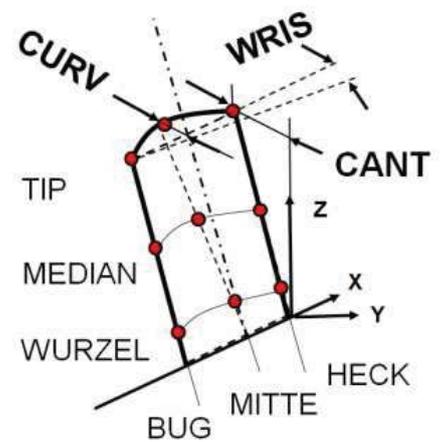
CURV I2C: die Tragfläche bildet in ihrer Ruhelage ein symmetrisches Profil aus. Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und zu einem asymmetrischen Profil der Tragfläche.

C2I: die Tragfläche bildet in ihrer Ruhelage ein asymmetrisches Profil aus. Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und zu einem eher symmetrischen Profil der Tragfläche.

WRIS T2N: die Tragfläche hat in ihrer Ruhelage mit einem Anstellwinkel größer Null gegenüber der Hauptströmungsrichtung des Fluids. Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und in Richtung einer Neutralstellung des Tragflügels relativ zur Strömung (twist to neutral).

N2T: das Flügelprofil der Tragfläche hat in seiner Ruhelage einen Anstellwinkel von Null gegenüber der Hauptströmungsrichtung des Fluids. Ein physikalischer Impact führt auf eine Strukturverformung und zu einer Anstellung des Tragflügels relativ zur Strömung (neutral to twist).

Die belastungsadaptiven Gestaltänderungsvorgänge am elastischen Tragflügel sind in ihrer Art Natur komplex. Mindestens zwei der formalen Verformungsaufgaben CANT, CURVE und WRIS bilden miteinander ein prozessorganisatorisches Beziehungssystem: sie bedingen einander und bilden ein Funktions- und gestaltemorphologisches Regime aus. Es ist davon auszugehen, dass zu einer komplexen Tragflügelverformung alle Wechselwirkungsphänomene CAN, CURVE und WRIS gleichzeitig Beiträge zu dem funktionsmorphologischen Regime leisten auf die der Gestaltungs- und Entwicklungsvorgang zielt. In der Konstruktionspraxis stellt sich heraus, dass das biologische Gestaltbildungs- bzw. Gestaltänderungsparadigma, dass die Elastizität des Mittelhandsystems aus den Fugen des „biologischen Getriebes“ stammt, in technischen CARPO-Gelenksystemen ungewollte Stabilitätsprobleme auftauchen lässt. Hier, bei den technischen Adaptionen soll (in einem ersten Hub) die für funktionsmorphologische Gestaltänderungen erforderliche Elastizität aus der Struktur stammen. Die belastungsinduzierten Gestaltänderungen setzen sich aus Verschiebungen und Verzerrungen der Struktur zusammen. In der Berechnungs- und Simulationspraxis zum Thema hat sich das systematische Monitoring



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

ausgewählter Spekulationsorte (gegeben durch TIP, MEDIAN, WURZEL und BUG, MITTE, HECK) auf der Tragflügelkontur bewährt. Die einschlägige Analyse der funktionsmorphologische Gestaltänderungen ist Gegenstand der avisierten Forschung. Solange wir die dreidimensionalen Gelenkgetriebe nicht vollständig verstehen, gelingt ein parametrisches, reversives Konstruieren nicht. Deshalb ist das Vorhaben CARPO so notwendig und nützlich.

GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNG

Das CARPO-Prinzip ersten Grades soll im Vorhaben CARPO.POC (Proof of Concepts) auf drei durchaus unterschiedliche Strömungsmaschinen angewandt und untersucht werden. Gegenstand der Untersuchung soll ein Axialgebläse, eine vertikalachsige Windkraftanlage (H-Rotor) und der Rotor einer Wellsturbine sein. Der jeweils kurzen Ausführung zum Stand der Technik ist eine daraus ableitbare Problemstellung angefügt und die vom CARPO-Prinzip getragene Lösungsoption benannt.

Gemeinsam ist den drei Maschinen, dass sie im Medium Luft arbeiten, das CARPO-Konstruktionsprinzip auf einen rotierenden Tragflügel angewendet werden soll und sich die jeweiligen Problemstellungen auf das Band wirkungsgradoptimaler Betriebszustände bezieht, das mit passiv adaptiven Tragflügeln verbreitert werden soll. Die Deformation soll sich in erster Linie auf die Tragflügelprofile und deren zu verbessernde Strömungswirklichkeit beziehen.

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

STATOREN	
KRAFT- und ARBEITS-TRAGFLÜGEL	
Vor- und Nachleitapparate, Leit- und Steuertragflächen	
ROTOREN	
KRAFT- TRAGFLÜGEL	ARBEITS-TRAGFLÜGEL
Windräder	Pumpen
Turbinen	Verdichter
TRANSVERTOREN	
KRAFT- und ARBEITS-TRAGFLÜGEL	
Biologische Flossen, Paddel, Yulohs	

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Krafttragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die geeignet sind, vornehmlich dem bewegten umgeben-dem Fluid Energie zu entziehen. Beispiele sind die Repellertragflächen einer Windkraftanlage, die Schaufeln einer Fließwasserkraftanlage oder ein Kanupaddel während des Manövrierens. Arbeitstragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die vornehmlich Energie in ein umgebendes Fluid einkoppeln. Beispiele sind die Leit- und Steuerflächen von Luft- und Seefahrzeugen, Schaufeln von fluid-mechanischen Antrieben und das Paddel eines Kanus oder eines Kajaks. Für Kraft- und Arbeitstragflächen von Strömungsmaschinen wird in der Regel eine mechanisch starre Form, ein deklaratorisch definiertes Profil und eine nichtflexible Kontur angestrebt. Die Profile von Kraft- und Arbeitstragflächen nach Stand der Technik sind hinsichtlich ihrer Lateralkontur in der Regel entweder definiert symmetrisch oder definiert asymmetrisch. Zentralsymmetrische Profile sind in der Konstruktionspraxis und in der Anwendung für Strömungsmaschinen eher unüblich. Eine Ausnahme bildet die gekrümmte Platte (längen-symmetrisches Profil) oder ebene Platte (lateral- und längensymmetrisches Profil) für einfachste Kraft- und Arbeitstragflächen, etwa bei kleinen Seefahrzeugen.

GEBLÄSE

STAND DER TECHNIK. Gebläse

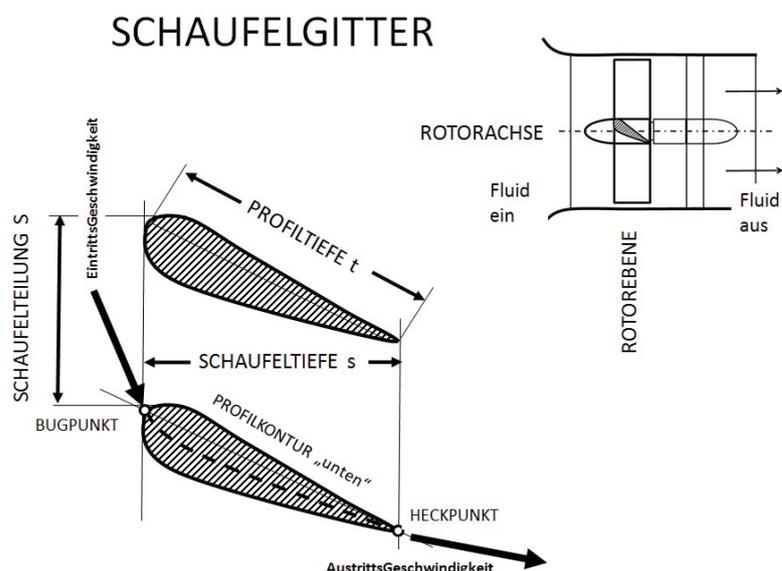
Pumpen, Verdichter und Gebläse sind Arbeitsmaschinen. In Strömungsarbeitsmaschinen wird von einem mit Schaufeln besetzten Rotor an ein kontinuierlich strömendes Fluid Arbeit übertragen und ihm dadurch Energie zugeführt. Verdichter und Gebläse sind entscheidende Elemente industrieller verfahrenstechnischer Prozessketten. Sie übernehmen vielfältige Förderaufgaben von Flüssigkeiten und Gasen in fast allen technischen Anlagen. Weltweit fließen etwa 20% der industriell eingesetzten Energie in (fluidische) Förderleistung.

Bei Axialgebläsen ist die parallel zur Rotorachse gelegene Geschwindigkeitskomponente maßgebend. Verdichter und Gebläse sind auf eine bestimmte Volumenförderleistung (bei definierter Druckhöhe) ausgelegt. In diesem Design-Betriebspunkt arbeitet das Gebläse optimal und mit hohem Wirkungsgrad. Der reale Fall stellt sich häufig anders dar: in der industriellen Praxis arbeiten Gebläse meist nicht im Design-Betriebspunkt. Ist die tatsächliche Kennlinie der zu versorgenden Anlage vom Auslegungsfall abweichend oder ist

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

der Förderbedarf schwankend, spricht man vom Off-Design-Betrieb. Fast alle Gebläse arbeiten mehr oder weniger im Off-Design. Verluste durch schlechtere Wirkungsgrade sind die Folge und summieren sich durch den stark verbreiteten Einsatz von Gebläsen zu beträchtlichen Summen. Sowohl aus wirtschaftlicher Sicht, als auch vor dem Hintergrund der aktuellen Umwelt- und Klimadebatte ist ein breiterer wirtschaftlicher Betriebsbereich von Lüftern und Gebläsen höchst wünschenswert. Unter den Strömungsmaschinen sind Gebläse besonders von der Verringerung des Wirkungsgrades durch den Off-Design-Betrieb betroffen. Während beispielsweise Umwälzpumpen wirtschaftlich durch eine Drehzahlregelung an die gegebenen Anforderungen angepasst werden können, besteht diese Möglichkeit für Gebläse nicht in gleichem Maße. Hier verschiebt sich der Betriebspunkt bei Drehzahlreduzierung in einen Bereich schlechterer Wirkungsgrade, so dass alle Möglichkeiten zur Einstellung verschiedener Förderströme wie Drehzahl- Drossel-, Bypass- oder An/Aus-Regelung mit stark verschlechtertem Wirkungsgrad einhergehen. Im Hinblick auf die Energieeffizienz der Gesamtanlage stellen alle diese Möglichkeiten Kompromiss-lösungen dar, von denen bei der Neuauslegung einer Anlage jeweils die Variante realisiert wird, von der die geringsten Verluste erwartet werden.

Tragflügelprofile für Axialgebläse. Die Axial durchströmte Arbeitsmaschine ist durch die Einfachheit ihrer Konstruktion und den vergleichsweise hohen Wirkungsgrad aus. Das Axialgebläse im Sinne einer „Kreisrad-Arbeitsmaschine“ legt die Betrachtung der Schaufeln als einen rotierenden Kranz von Tragflügeln nahe. In der Regel sind die Tragflügel profiliert; die Profilkontur ist asymmetrisch. An der Eintrittskante (bugwärtig) sind die Profile der Schaufeln angerundet, besitzen (auf der Höhe der Dickenrücklage) eine gewisse Fülle und laufen heckwärtig schlank aus. Die Krümmung ist eine Kurve bezüglich der Linie vom Bugpunkt und Heckpunkt. Die Profiltiefe t ist von der Schaufeltiefe s zu unterscheiden. Der Rapport der Tragflügel über den Umfang der Nabe ist die Schaufelteilung S . Bei Abwicklung der Zylinder-



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

oberfläche des coaxialen Zylinderschnitts auf eine Ebene bilden die Konturen der Schaufelprofile das Schaufelgitter (wie in der schematischen Skizze ersichtlich). Die Strömungslinie, auf der der Bugpunkt liegt, identifiziert die Eintrittsgeschwindigkeit in Richtung und Betrag; der Heckpunkt die Austrittsgeschwindigkeit in Richtung und Betrag.

Die Tragflügeltheorie behandelt bei guter Übereinstimmung von Berechnung und Versuch die Analyse der Strömungswirklichkeit um Tragflügel mit kleinen Strömungsablenkungen. Die tatsächliche Ablenkung der Relativströmung ist bei vielen Axialgebläsen eher gering und bei kleinen Schaufeldichten ($S/s < 1$) dürfen die Schaufeln wie Tragflügel in einer freien Strömung betrachtet werden¹⁰. Das ist für unsere Betrachtungen von Vorteil. Auf der Grundlage potentialtheoretischer Untersuchungen werden wir im Vorhaben CARPO-POC die für die anzutreffenden Anströmbedingungen vorteilhaften und sich unterscheidenden Profilkonturen gegenüberstellen. Fragen wir an dieser Stelle kurz, warum die Strömungswirklichkeiten am Schaufelgitter variieren: Mit wachsender Drehzahl des Laufzeugs wird der Eintrittswinkel der Strömung flacher. Ebenso wächst aus rein geometrischen Gründen die „scheinbare“ Eintrittsgeschwindigkeit mit dem Abstand des betrachteten Profilquerschnitts von der Rotationsachse. Die Nabenverkleidung des Laufzeugs der Axialkraftmaschine formt ebenfalls das Profil (den Gradienten) der Zuströmgeschwindigkeit auf das Schaufelgitter in Richtung und Betrag. Auch hier ist die Strömungswirklichkeit von der Geometrie des vorgelagerten Kanals oder der Einlaufhütze beeinflusst.

STAND DER TECHNIK. Variable Geometrie von Leitapparat und Laufzeug

Die Gebläsekennlinie, die gemeinsam mit der Anlagenkennlinie den Betriebspunkt bestimmt, ist eine Funktion der Gebläsegeometrie. Um einen breiteren optimalen Betriebsbereich zu erhalten, gibt es seit längerer Zeit die Idee, die Schaufel- oder Leitgittergeometrie variabel zu gestalten. In verschiedenen Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften werden Mechanismen vorgeschlagen, die eine variable Krümmung der Profilgeometrie einer Schaufel oder Tragfläche ermöglichen. Von Seilzugmechaniken (EP 089 057 A2; 1999) über bewegliche Klappen (DE 199 09 899 A1; 1999) bis hin zu Verformungen des Flügelprofils durch Druckbeaufschlagung im inneren (DE 100 15 942 A1; 2000) (DE 102 56 008 B3; 2004) werden hier unterschiedliche Herangehensweisen letztendlich mit dem Ziel formuliert, die Tragfläche oder

¹⁰ Vergleiche Kalide, W. (1989) Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen, S. 232. 7. Auflage, Hanser Verlag München, Wien

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Schaufel an variable Betriebszustände anzupassen. Bewegliche Klappen an Vorleiträdern von Axialpumpen wurden in einer Dissertation an der TU-Berlin (Radke, M. 1992) untersucht. Von außen angesteuert, sorgen diese für angepasste Zustromverhältnisse am Rotor und ermöglichen über eine Steuerung einen geringeren Abfall des Wirkungsgrades im Off-Design-Betrieb. Eine neuere Entwicklung verfolgt die Idee, die Schaufelgeometrie mit Hilfe einer kinematischen Kette adaptiv zu gestalten (Müller/ Lawrenz 2004). Hier liegt die Intension auf der Gestaltung adaptiver Verdichterschaufeln und/oder Leitrad-schaufeln in Axialverdichtern, die so in einem bestimmten geometrischen Bereich kinematisch reagieren können. Die Schaufel besteht dabei aus drei Segmenten, die gelenkig verbunden sind. Die naturgemäß unsteten Übergänge einer solchen Segmentkette sollen dabei durch Hautplatten geglättet werden.

Als Beispiel für die Wirksamkeit von verstellbaren Leitschaufeln, ist die Variable Nozzle Turbine (VNT) bei Abgasturboladern zu nennen. Die winkelverstellbaren Schaufeln des Vorleitapparates der Turbine ermöglichen hier einen breiten Betriebsbereich. Die VNT-Technik ist Stand der Technik und wird bereits sehr erfolgreich z.B. in PKW eingesetzt. Mit Ausnahme der kinematischen Kette von Müller und Lawrenz beziehen sich die bisher vorgeschlagenen und untersuchten Mechanismen auf die Schaffung einer Schnittstelle zwischen Flügel/ Schaufelgeometrie und einer, wie auch immer gearteten Aktuator, Steuer- oder Regelanlage; also auf die Herstellung der Steuerungsfähigkeit des Profilkörpers. Für die Verstellung muss jedoch mit entsprechendem Steuerungsaufwand Energie in den Profilkörper eingeleitet werden. Den aufgeführten Konstruktionen ist gemein, dass sie zum Betrieb einen hohen Aufwand an Struktur, steuernder und regelnder Elektronik erfordern.

Axialgebläse skalieren von etlichen Metern (Kühltürme) über Tunnelventilatoren, Entrauchungsgebläsen und Motorkühlungen bis zu Zentimetern in PC-Lüftern und Zentimetern in Kleinstgebläsen. Den Entwicklungskriterien übergeordnet sind in der Regel hohe Volumenströme bei geringem Energieverbrauch und damit hoher Effizienz. Ein Effizienzkriterium ist die durch die Tragflügel des Laufzeugs generierbare Kraft. Schaufelkraft entsteht, wenn durch das Umströmen der Schaufel der Druck auf einer Seite größer ist, als auf der anderen. So sind z.B. in Axialmaschinen mit in Axialrichtung gekrümmten Schaufeln die Geschwindigkeiten nahe der Hohlseite kleiner als auf der Rückseite mit der Folge, dass der Druck auf der Hohlseite größer ist als auf der Rückseite. Die als Druck auf der Schaufeloberfläche wirkenden Normalkräfte haben eine Resultierende, die den wesentlichen Teil der Schaufelkraft ergibt. Als Reaktion auf das Integral aller an den Schaufeln angreifenden Kräfte wird

die Strömung umgelenkt¹¹. Die Anordnung der Schaufeln in einer Ebene auf dem Rotor bilden das für die betrachtete Maschine typische Schaufelgitter ab. Die Hauptaufgabe bei der Gitterauslegung besteht darin, den Zusammenhang zwischen der geometrischen Form der Beschaukelung und der Strömung zu bestimmen. Form und Stellung der Schaufeln ist so zu bestimmen, dass die gegebene Zuströmung im Gitter in eine bestimmte Abströmung übergeführt wird. Für einen strömungstechnisch vorgegebenen Fall setzt der Gitterentwurf inverse Verfahren zur Bestimmung der entsprechenden Formen der Schaufeln und ihrer Stellung im Gitter voraus. Auslegungsziele sind Effizienz der Strömungsbeschleunigung, Minimierung der der Strömung im Gitter aufgeprägten Verluste und Standhaltigkeit der Schaufeln hinsichtlich der Beanspruchungen durch Strömungskräfte und der mechanischen Belastung durch Fliehkräfte. Kriterien für die zweckmäßige Stellung der Schaufeln im Gitter sind (1) Belastungskenngrößen stationär und bei Steigerung der Umlenkung, denn Schaufeldichte und die engste Stelle f zwischen den Schaufeln stellen einen Zusammenhang mit Ablöse-Effekten der Strömung bei Änderung der Zuströmrichtung her, (2) Profilverluste und (3) Verluste an den Schaufelenden.

Die kollektive Blattverstellung für Axialgebläse ist Stand der Technik, soll aber für die Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens CARPO-POC keine nennenswerte Rolle spielen. (siehe auch: Kennfelder / Gebläsekennlinie)

PROBLEMSTELLUNG. Verdichter und Gebläse

Die Tragflügel der Lüfter und Gebläse vom Stand der Technik sind starr. Die konstruktive Auslegung der Strömungsmaschine besitzt nur einen Schnittpunkt mit der Kennlinie der zu versorgenden Anlage. In der industriellen Praxis ist der Förderbedarf meist schwankend und das Gebläse arbeitet nicht im Auslegungs-Betriebspunkt, sondern im Off-Design-Betrieb. Verluste durch schlechtere Wirkungsgrade sind die Folge.

PROBLEMLÖSUNG. Verdichter und Gebläse. (CARPO.FAN)

Die Minimierung der Verluste ist der zentrale Gegenstand der Untersuchungen von Tragflügelgeometrien im Vorhaben CARPO-POC. Eingedenk der oben benannten Abhängigkeiten sind für eine gegebene Drehzahl des Laufzeugs die Schaufelgeometrie und das Schaufelprofil einer Optimierung zugänglich. Wir sprechen von einer Konditionierung, wenn sich die Anpassung auf eine Schar

¹¹ Aus: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, (2005) Strömungsmaschinen, Allgemeine Grundlagen S. R1. 21. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

von Betriebspunkten auf der Kennlinie erstreckt und die Leistungsentwicklung über die Drehzahl eine gewisse Robustheit besitzt. Genau hier setzt die Untersuchung profilvariabler Tragflügelgeometrien (wölb- und knickbare Profilkonturen) des avisierten Vorhabens CARPO.POC an.

Der physikalische Impact der fluidmechanisch wirksamen Gebläse-Rotortragfläche ist gegeben durch (1) die Fliehkräfte an der Struktur und (2) den Strömungsdruck auf die Tragflächenkontur. Das Verformungsgebaren entspricht einer Relaxation im oben beschriebenen Sinn. Eine derart formulierte autoadaptive Tragfläche nimmt durch Wechselwirkung mit der Strömung eine Gleichgewichtslage an, die je nach Belastung variiert. Bei verändertem Betriebszustand passt sich die fluidmechanisch wirksame Fläche entsprechend der (1) Fliehkraftbeaufschlagung und (2) Druckverteilung an und kann damit eine Ablösung der Strömung weitestgehend vermeiden. Als Resultat dessen kann der Wirkungsgrad des Gebläses auch bei Variation von Betriebszuständen weitgehend erhalten bleiben. Die Kennlinie des Wirkungsgrads wird in der Umgebung des Optimalpunktes flacher, der nutzbare Bereich des Gebläses breiter. So die Theorie.

Eine Entkopplung der Rotationskräfte aus dem gestaltändernden physikalischen Impact des adaptiven Tragflügels ist als Konzept und Design auszuloten.

H-ROTOR

STAND DER TECHNIK. H-Rotoren

Über die Bedeutung der Windkraft beim Ausstieg aus der Fossilen Energie und dem Rückbau der Kernkraftwerke besteht kein Zweifel. Nicht alleine aufgrund der geologischen Gegebenheiten Europas sind erneuerbaren Energien wie z. B. Wasserkraft, Windenergie, solar Strahlung, Erdwärme und nachwachsende Rohstoffe nicht gleich gestellt. Auch politische Widerstände müssen weiterhin überwunden werden. Nach den herrschenden Wirtschaftsregeln muss ein substituierendes Energieversorgungssystem ad hoc den Stand der etablierten Technik übertreffen. Hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Energieeffizienz gilt die rezente Windenergieanlage als ausgereizt. Neben den großen On- und Offshore-Windparks haben in den vergangenen Jahren kleine und Kleinstwindanlagen für den urbanen Raum an Bedeutung gewonnen. Die Konzepte für städtische Windenergieanlagen werden cleverer. Stand bislang die Stromversorgung des Endverbrauchers im Mittelpunkt befürwortender und ablehnender Diskussionen, erlangen Systemkonzepte, wie Wasserpumpen oder

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Heizmühlen zur Warmwasseraufbereitung wieder an Bedeutung für die dezentrale additive Wärmeversorgung privater Liegenschaften, aber auch die lokale Energieversorgung von Funkmasten, die Bordelektronik auf Schiffen oder auch Substitutionen für teuer zu unterhaltende Dieselaggregate in Schwellen- und Entwicklungsländern. Hier ergibt sich (erneut) ein Marktsegment für kleine, effiziente, dezentrale Windkraftanlagen. Waren die vertikalachsigen Savonius-, Darrieus- und H-Rotoren (Vertical Wind Turbines, VAWT) in den 80er Jahren noch eine ernst zu nehmende Alternative zum klassischen horizontalachsigen Windrad (Horizontal Wind Turbines, HOWT), ging in den nachfolgenden Jahren mit der Optimierung der 3-Blatt-Horizontalmaschine die Schere der erreichbaren Wirkungsgrade weiter auseinander und die aus der Einfachheit der vertikalachsigen Maschine resultierende Wirtschaftlichkeit geriet aus dem Blickfeld der Anwender und der Forscher. Dabei hat diese Maschine gewisse Vorteile: Die Energienutzung ist bei der vertikalen WKA unabhängig von der Windrichtung. Die Schallemission ist geringer als bei den Horizontalachsern. Bei Darrieus- und H-Rotoren können die zur Energieumwandlung erforderlichen mechanischen sowie elektrischen Komponenten (Lagerung, Getriebe, Generator und Bremse) in Bodennähe platziert werden. Eine dieserart geerdete Konstruktion ist vorteilhaft hinsichtlich Betrieb und die Wartung und ideal für urbane Anwendungen. Verglichen mit Horizontalachsern ist die Schwerkraftbelastung der Rotorblätter immer gleichmäßig; Schwingungen, Gewichts- und Rotationsbelastungen können durch einfache konstruktive Maßnahmen gut begegnet werden. Nachteile sind neben einer konzeptionell und konstruktiv schwer zu lösenden Sturmsicherung, dass bodennahe Böen oder Turbulenzen beim schnell laufenden Vertikalachser die Gefahr für einen frühzeitigen Strömungsabriss am Rotorblatt bergen.

Darrieus- und H-Rotoren besitzen aerodynamisch Auftrieb erzeugende Tragflügel, während der Savonius-Rotor als Widerstandsläufer¹² gilt. Der H-Rotor ist eine besonders einfache und robuste Ausgestaltung des ursprünglichen Darrieus-Prinzips. Während die gebogenen Blätter des klassischen Darrieus-Rotors oben und unten mit der Rotorachse zusammenlaufen, besteht der H-Darrieus-Rotor aus geraden, parallel zur Drehachse angeordneten Blättern an Tragarmen. Die Bauform mit zwei oder mehr senkrecht stehenden Blättern und einem horizontalen Tragarm erinnert an den Buchstaben „H“, daher der Name. Als Tragflügelprofile werden häufig

¹² Theoretische und experimentelle Untersuchungen am HFI der TU Berlin legten schon in den 80er Jahren d.v.J. die Vermutung nahe, dass (zumindest bei der zweiblättrigen Variante) Pulsationsvorgänge im -in der Maschine „stehenden“- Luftvolumen für Drehzahlüberhöhungen verantwortlich sind.

symmetrische Konturen der vierstelligen NACA-Serie verwendet (z.B. NACA 0016)¹³. H-Rotoren vermeiden einige Nachteile des klassisch gebogenen Darrieus-Rotors. (1) Alle Bereiche eines Blattes bewegen sich gleich schnell, mit einheitlichem Anstellwinkel. (2) Eine Abspannung aus der wirksamen Fläche heraus nach unten ist möglich. (3) Geringerer Materialeinsatz bei höherem Leistungsbeiwert für die gleiche aerodynamisch wirksame Fläche. Eine windrichtungsgeführte Blattwinkelverstellung (giromill) kann das Anlaufverhalten und den Wirkungsgrad verbessern. Das Prinzip ist bereits seit den frühen 1970er Jahren bekannt. Dem höheren Wirkungsgrad und besserem Anlaufverhalten steht die Wirtschaftlichkeit bestimmend der höhere Bauaufwand entgegen. Im Bereich bis zu 10 kW Nennleistung werden kommerzielle Anlagen, die mit einer windrichtungsgeführten Blattverstellung arbeiten, beworben. Ob bzw. in welcher Zahl solche Anlagen in Betrieb sind, ist nicht bekannt. In neuerer Zeit sind auch Konzepte entwickelt worden, den H-Rotor in einer Meeres- oder Flussströmung unter Wasser zu nutzen.¹⁴

PROBLEMSTELLUNG. H-Rotoren

Bodennahe Böen oder Turbulenzen, die für Widerstandsläufer kein Problem darstellen, sorgen sie beim Darrieus- oder H-Rotor für einen frühzeitigen Strömungsabriss am Rotorblatt. Erst ab bestimmten Drehzahlen wird die wechselseitige Beaufschlagung der Tragflügel von der Maschine nur noch als eine pulsierende Richtungsänderung der Strömung wahrgenommen. Eine ernste Konzept- und Gestaltungsaufgabe birgt die geringe Anlaufwilligkeit der Darrieus- und H-Rotoren. Es ist auf Dauer keine Lösung, einen H-Rotor elektrisch (mit dem Generator als Motor) anzuwerfen. Darrieus-Maschinen, die mit einem Savonius-Läufer starten, der bei hohen Drehzahlen freiläuft sind aufgrund des größeren strukturellen Aufwands eher unwirtschaftlich. Eine kollektive Blattverstellung (Pitch) kann bei gleichzeitiger Inkaufnahme konstruktiver Komplexität und Steuer- und Kontrollaufwands das Anlaufverhalten und den Leistungsbeiwert der Maschine verbessern. Wünschenswert wären drehzahl- und belastungsabhängige Tragflügelprofile, die sich passiv – und am besten unabhängig voneinander – die herrschende Strömungswirklichkeit adaptieren.

¹³ NACA0015 hat eine Profilwölbung sowie eine Wölbungsrücklage von 0% und eine Profildicke von 15%.

¹⁴ Nach: <https://de.wikipedia.org/wiki/Darrieus-Rotor>

PROBLEMLÖSUNG. H-Rotoren (CARPO.H).

Eine adaptive Schaufel nach dem CARPO-Gestaltungsprinzip könnte im Gegensatz zu einem starren symmetrischen Profil über die gesamte Rotationsperiode Wellenperiode und bei unregelmäßiger Strömungsbeaufschlagung eine verlustarme Strömungsumlenkung und damit Energiewandlung gewährleisten, was den Wirkungsgrad der Anlage erhöht. Gleichzeitig stellt die Anwendung des CARPO-Prinzips als Schaufel im rotierenden System mit starker Verformung einen extremen Fall dar, der geeignet ist, die Leistungsfähigkeit des Mechanismus unter Beweis zu stellen. Eine Entkopplung der Rotationskräfte aus dem gestaltändernden physikalischen Impact des adaptiven Tragflügels ist als Konzept und Design auszuloten.

WELLS TURBINEN

STAND DER TECHNIK. Wells Turbinen.

Vor dem Hintergrund der Verknappung fossiler Energieressourcen, dem Ansteigen der Rohstoffpreise und zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs erscheint die Ausnutzung der Wellenenergie in Küstennähe als Energiequelle wirtschaftlich. So kann beispielsweise mit Hilfe einer Strömungskraftmaschine der Brandungswellenhub genutzt werden um Wellenenergie in mechanische und/oder elektrische Energie umzuwandeln. Der Betrieb eines derartigen Energiewandlers erfordert eine zum Meer hin offene Kammer (Wellenkollektor), in der sich der Wasserspiegel aufgrund der Wellenbewegung periodisch hebt und senkt. Die Kammer ist mit der Umgebung durch einen Strömungskanal verbunden, in dem Luft geführt wird. Bei Wellengang setzt die oszillierende Wassermasse das darüber befindliche Luftvolumen in Bewegung, was zu einer Luftbewegung im Strömungskanal mit zyklisch wechselndem Richtungssinn führt: OWC-Prinzip (Oscillating Water Column). Im Strömungskanal (Luftseite des Kollektors) befindet sich eine Turbinenanlage mit dem charakteristischen Merkmal, dass unabhängig von der Durchströmungsrichtung, das Laufzeug der Turbine stets in dieselbe Richtung rotiert. Eine, sich stets in dieselbe Drehrichtung rotierende, aber aus unterschiedlichen Strömungsrichtungen beaufschlagte Strömungskraftmaschine ist die Wellsturbinen, eine ummantelte Axialströmungskraftmaschine. Bei den bislang bekannt geworden ausgeführten Wellsturbinen besitzen die zahlreichen (acht und mehr) Rotorblätter nach Stand der Technik symmetrische

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Profile und sind starr. Prinzipbedingt ist der Anstellwinkel der Rotorblattprofile gleich Null. Die durch den Hub der Welle periodisch wechselnde Durchströmungsrichtung des Rotors (nachfolgend Repeller genannt) kehrt die Strömungsbedingungen in der gesamten Anlage periodisch und äquivalent zum Wellenzyklus um. Die Drehzahl ausgeführter Wellsturbinen liegt je nach Beschauelung des Rotors bei einigen tausend Umdrehungen pro Minute, während die axiale Durchströmungsgeschwindigkeit der Luft bauartabhängig zwischen 0 und etwa 30 m/s liegt. Die Schwingungsdauer einer Wellenbewegung liegt bei einigen Sekunden. Ergebnisse über die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit und der technischen Funktionalität einer ausgeführten OWC-Anlage (Islay Wells Air Turbine) wurden von Whittacker et. al. (1993) veröffentlicht. Whittacker berichtet, dass eine der größten Schwierigkeiten der ausgeführten Maschine – neben einer offensichtlichen Überdimensionierung – in der Luftströmung an der Turbine besteht, die nicht die vorhergesagten sinusförmigen Schwingung unterliegt. Eine situative, gegebenenfalls lokale Reaktion der Maschine auf sich ändernde Strömungsverhältnisse ist nicht Stand der Technik.

Ummantelte Axialströmungskraftmaschinen mit wechselnder Durchströmungsrichtung haben bauartbedingt eine Nabe, die im Wesentlichen parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet ist und wenigstens eine Rotorebene mit nach Stand der Technik zwei oder mehreren Repellertragflächen, die üblicherweise orthogonal zur Strömungsrichtung angeordnet sind. In einer praktisch ausgeführten Anlage wird der Rotor mit acht Repellerblättern betrieben [BHT-10]. Die Schnelllaufzahl des Repellers ist auch bei ummantelten Axialströmungskraftmaschinen von entscheidendem Einfluss auf die Auswahl der Energie wandelnden Elektrogeneratoren [Gasch-05]. Die Schnelllaufzahl ist eine wichtige Kennzahl für die Auslegung von Windkraftanlagen. Sie gibt das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors zur Windgeschwindigkeit an. Der reziproke Wert der Schnelllaufzahl ist im Turbinenbau und in der Propellertheorie als Fortschrittsgrad bekannt. Widerstandsläufer, wie beispielsweise historische Windmühlen, haben eine Schnelllaufzahl kleiner eins. Aus der Schnelllaufzahl und dem meist nach außen flacher werdenden Einstellwinkel ergibt sich der Anstellwinkel der Strömung zum Blattprofil. Da sowohl der Impulsstrom des Windes, den es zu etwa $2/3$ auszubremsen gilt (Betz'sches Gesetz), als auch die aerodynamischen Kräfte etwa quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit zunehmen, ist für einen konstanten Erntegrad die Schnelllaufzahl nahezu unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Entsprechend der Schnelllaufzahl wird unterschieden in Langsamläufer mit einer Schnelllaufzahl etwa zwischen 1 und 3 und Schnellläufer mit einer

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Schnelllaufzahl etwa zwischen 5 und 7...8. Windräder mit einer Schnelllaufzahl größer 10 werden wegen der hohen Schallemission heute in der Regel nicht mehr gebaut [www-02]. Mit hohen Schnelllaufzahlen lassen sich kleinere, weniger gewichtige getriebelose Generatoren bei gleicher Energieausbeute realisieren. Bisher bekannt gewordene ummantelten Axialströmungskraftmaschinen, insbesondere Wellsturbinen, besitzen Repeller mit vielen (acht und mehr) fluidmechanisch wirksamen Tragflächen, wie oben beschrieben. Bei nichtummantelten Axialströmungskraftmaschinen (z.B. Windkraftanlagen), sind auch einarmig ausgeführte Rotorkonstruktionen bekannt. Ummantelte Axialströmungskraftmaschinen mit wechselnder Durchströmrichtung werden verfahrensbedingt nicht in einem Betriebspunkt sondern (periodisch) entlang einer Kurve von Arbeitspunkten (Drehzahl- Beaufschlagungslast-Kollektiven) betrieben, deren Bandbreite erheblich groß sein kann. Für derartige Axialströmungskraftmaschinen bedeutet der nichtstationäre Betrieb mit wechselnder Durchströmrichtung periodisch schwellende Drehzahl- Beaufschlagungslast-Kollektive und somit ein Betrieb der Turbine mit zyklischem Beschleunigen und Verzögern des gesamten Laufzeugs. Die mechanische, insbesondere die schwingungsdynamische Belastung des Laufzeugs der Axialströmungskraftmaschine ist hoch. Durch die zyklische, nicht stationäre Strömungsbeaufschlagung und das damit verbundene Beschleunigen und Verzögern des gesamten Laufzeugs der Turbine sind die Strömungsverluste im Drehzahlübergang hoch. Zur Steigerung der Effizienz einer Axialströmungskraftmaschinen mit wechselnder Durchströmrichtung besteht die Notwendigkeit diese maschinendynamisch (hinsichtlich des Laufzeugs) und strömungsmechanisch (hinsichtlich des Repellerflügels) zu optimieren.

PROBLEMSTELLUNG. Wells Turbinen

Die nach ihrem Erfinder benannte Wells- Turbine ist eine, wird in Wellenkraftwerken eingesetzt und arbeitet in einem oszillierenden Luftstrom. Sie besteht aus einem Rotor, an dem starre, symmetrische Profile montiert sind. Diese, bislang mit starren symmetrischen Schaufeln ausgestattete Turbine kann in beide Richtungen angeströmt werden, behält dabei aber ihre Drehrichtung bei. Auf Grund dieser Eigenschaften wird sie z.B. in Wellenkraftwerken eingesetzt, wo mit oszillierenden Strömungen elektrische Energie erzeugt werden soll. Die starren, symmetrischen Schaufeln dieser Turbine sind auf einem Rotor befestigt, der sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit dreht. Wird nun eine axiale Strömung von der einen oder der anderen Richtung überlagert, entstehen an den Schaufeln ausreichend kleine

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Anstellwinkel, so dass an ihnen eine radiale Kraft und somit ein Moment in Drehrichtung entsteht. Mit optimierten Schaufelprofilen können Wirkungsgrade bis zu 60% erreicht werden. Große Ablösungsgebiete an den Saugseiten der Schaufeln und fehlende Leiteinrichtungen bewirken einen hohen Druckverlust in der Turbine, ohne dass dieser in entsprechende Rotorleistung umgewandelt werden könnte. Der Repeller einer Wellsturbine wird Prozess- und bauartbedingt von beiden Seiten fluidmechanisch beaufschlagt. Stand der Technik sind Repeller-tragflächen mit symmetrischer Profilkontur. Tragflächensysteme mit symmetrischen Profilkonturen sind grundsätzlich in der Lage, der Strömung aus beiden Anströmrichtungen Energie und entziehen. Jedoch ist die Ausbeute an zur Energiewandlung verwertbarer Querkraft beispielsweise eines symmetrischen Plattenprofils klein. Schon eine geringe Deformation (Wölbung von wenigen Prozent) des Plattenprofils kann die Querkraft mehr als verdoppeln. Proflexible, reversibel wölbbare oder scharnierartig ausgeführte Bauweisen für Repellertragflächen sind nicht Stand der Technik. Die besonderen Anforderungen von Axialturbinen in Wellenkraftwerken machen aber geometrieflexible Repellertragflächensysteme die nichtsymmetrische Strömungsprofile ausbilden können wünschenswert. Die einfache Anordnung ohne Leitschaufeln oder bewegliche Flügel gewährleisten einen robusten Betrieb, gestatten jedoch auch keine hohen Wirkungsgrade

PROBLEMLÖSUNG. Wells Turbinen (CARPO.WELLS).

Der Einsatz von autoadaptiven Schaufeln in einer solchen Turbine könnte nicht nur durch stark verminderte Ablösung den Wirkungsgrad steigern, sondern stellt zudem auch besonders hohe Testvoraussetzungen an die adaptiven Eigenschaften der Tragfläche.

Im „Labor für konventionelle und erneuerbare Energien“ der BHT- Berlin ist ein Wellenkanal mit Druckkammer und einer Wellsturbine vorhanden. Nach dem Bau sind Studenten und Mitarbeiter nun mit der weiteren Optimierung der Anlage beschäftigt und haben bereits eine betriebssichere Konfiguration erarbeitet. Für den autoadaptiven Flügel bietet die Wellsturbine eine hervorragende Möglichkeit, dessen Funktionsfähigkeit unter Beweis zu stellen. Eine adaptive Schaufel könnte im Gegensatz zu einem starren Profil über die gesamte Wellenperiode auch bei unregelmäßigen Wellen eine verlustarme Strömungsumlenkung gewährleisten und damit den Wirkungsgrad der Anlage erhöhen. Eine Entkopplung der Rotationskräfte aus dem gestaltändernden physikalischen Impact des adaptiven Tragflügels ist als Konzept und Design auszuloten.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

CARPO-WELLS wäre eine erste fundamentale Übertragung des biologischen Gestaltungsprinzips „*Carpus*“ auf eine strömungsadaptive (artifizielle) Krafttragfläche einer wechselseitig beaufschlagten Axialturbine. Unter fluidischer Belastung weicht die CARPO-Tragflügel-Struktur geringfügig der Querströmungskraft aus (*Canting*). Zwangskinematisch (*i-mech*) wechselt die Tragfläche in einen räumlichen Verformungszustand (*Adaption*) und eine asymmetrische Profilkontur entsteht. Strömungstheoretische Voruntersuchungen legen den Schluss nahe, dass die nun wirksame Strömung am Tragflügelprofil die Auftriebskraft (*Lift*) des Tragflügels vergrößert und zugleich den schädlichen Strömungsabriss (*Separation*) zeitlich hinauszögert. Der Strömungswiderstand (*Drag*) der verformten Tragfläche ist geringer als jener der symmetrischen Kontur im Ablösungszustand (*Stall*).

BIOLOGIE und TECHNIK

STAND DER WISSENSCHAFT. BIOLOGIE.

So elegant: Der Sprung der Katze im Angriff, der kunstvolle Flug der Möwen, die faszinierende Manövrierfähigkeit einer Forelle. Betrachtungen, nach denen - angesichts der erschlagenden Komplexität der kinematischen Vorgänge - alle Bewegungen der Wesen aktiv gesteuert und kognitiv kontrolliert werden, wohnt ein Zweifel inne. Wie sich angesichts der jüngsten Forschung immer deutlicher herausstellt, liegt es auch nicht in der "Strategie der Natur", alle Bewegungen exakt zu beherrschen, sondern Gleichgewichtsphänomene und Eigenformen von Strukturen und Moden der Bewegungen zu nutzen, um Bewegungsabläufe weitgehend autonom auszuführen; man möchte in diesem Zusammenhang von einer körperintelligenten Kinematik sprechen. Gliedmaßen werden nicht genau positioniert, sondern mit Hilfe der Muskelspannung in einen anderen Gleichgewichtszustand gebracht, der die gewünschte Position oder den Bewegungsmodus beinhaltet. Das dynamische Gleichgewicht des Systems in der Wechselwirkung mit der Umwelt wird so zum Bestandteil jeder Bewegung. Bewegungssysteme sind darüber hinaus so gestaltet, dass sie auf Änderungen in der Umwelt mit minimalem Kontrollaufwand adaptiv reagieren können. Viele Ausgleichsbewegungen laufen sogar vollständig passiv ab. Dadurch reduziert sich der erforderliche Kontrollaufwand für den Organismus erheblich (morphological computation) [Pfeif-07][Siewert].

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Biologische Systeme und Strukturen, die durch ihre Gestalt in für das Gesamtsystem vorteilhafter Weise reagieren, besitzen eine ihnen „inhärente intelligente Mechanik“ und sind überall in der belebten Natur zu finden: von den flexiblen Sehnen im Bewegungsapparat des Menschen über die Strömungskontrolle durch flexible Federn beim Vogelflug bis hin zu Grashalmen, die sich durch Biegung einer Überlastung entziehen.

Technik. In den verschiedensten Bereichen der Technik kommen Konstruktionselemente zum Einsatz, die unter Belastung verformt werden und deren aufgrund einer Krafteinwirkung nachgiebig-elastisches konventionelles Verformungsverhalten mit der Richtung der auf das betreffende Bauteil wirkenden Kraft korreliert. Bei bestimmten Gestaltungsanforderungen, beispielsweise im Fahrzeugbau, im Strömungsmaschinenbau sowie im Apparatebau, ist es jedoch wünschenswert, dass eine der Kraftwirkungsrichtung entgegen gesetzte Formänderung des Bauteils erzielt wird. Ein derart paradoxes – nicht eindeutig nachgiebig-elastisches - Verhalten zwischen der Beaufschlagungsrichtung und der daraus resultierenden Formänderung eines Bauteils (Beaufschlagungs- Formänderungsgebaren) im Zusammenhang mit einem Gesamtsystem ist insbesondere dann von Vorteil, wenn dadurch strömungsmechanische Vorteile erzielt oder verbessert werden kann. Die Beaufschlagung des Bauteils kann einseitig oder wechselseitig sein und die Systemantwort kann unsymmetrisch oder symmetrisch sein.

In der Technik ist ein paradoxes Kraftwirkungsrichtungs-Formänderungsverhalten bisher nur mit komplexen mechatronischen Sensor-Aktor-Anordnungen und somit einem entsprechend hohen regelungstechnischen Kontrollaufwand realisierbar und zudem mit einem hohen Gewicht und hohen Kosten verbunden. Bei fluidisch beaufschlagten Bauteilen, die beispielsweise symmetrisch ausgebildet und beidseitig fluidisch belastet sind, aber auch bei fluidbeaufschlagten Kraft- und Arbeitstragflügeln in Strömungsmaschinen und anderen in einem Fluid arbeitenden Leit-Systemen sind die angeströmten Flächen einer erheblichen mechanischen Belastung ausgesetzt. Hier folgt die Richtung der Formänderung der beaufschlagten Bauteilanströmflächen der Richtung des Lasteintrags und führt zu veränderten, strömungstechnisch ungünstigen Anströmbedingungen an den Leit- oder Steuerflächen. Der Änderung der Anströmbedingungen durch eine der Lastbeaufschlagungsrichtung folgende elastisch-nachgiebige Formänderung versucht man bisher mit einem erheblichen regelungstechnischen und mithin kostenintensiven Aufwand zu begegnen. Wünschenswert wären Konstruktionselemente mit

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

nichtorthodoxem (wie oben beschrieben paradoxem, nicht eindeutig nachgiebig-elastischem) Verhalten zum Einsatz als belastungsadaptive Bauteile für Strömungs-maschinen und anderen Anwendungen.

PROBLEMSTELLUNG. Bionik

Die Bionik verbindet Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften mit dem Ziel, Prinzipien der belebten Natur zu entschlüsseln und diese auf Technik zu übertragen. Seitens der Industrie besteht ein klares Interesse an Problemlösungen aus der belebten Natur. Für die erfolgreiche Übertragung biologischer Prinzipien auf technische Produkte und Verfahren bedarf es der Entwicklung von Methoden, Vorgehensweisen und Instrumenten, die den industriellen Produktentwicklungsprozess unterstützen. Traditionelle Produktentwicklungsverfahren betreffen Fragestellungen, mit denen möglichst alle Informationen erarbeitet werden, die für das Konzept, den Entwurf und die Erstellung von Fertigungsunterlagen eines Produkts notwendig sind, bis hin zur Einführung in den Markt. Bei der Übertragung von Kenntnissen der Biosystemanalyse auf Technik im Sinne der Bionik taucht das Problem auf, dass sich gerade die hochkomplexen, teilweise bis an die Grenze des physikalisch Machbaren optimierten biologischen Prozesse und Bauweisen einer unmittelbaren Transformation auf technische Fragestellungen entziehen. Die Ursache dieser Hemmnisse ist offenbar darin zu suchen, dass oftmals die komplexen Zusammenhänge der Biologie nur unzureichend wiedergegeben werden oder diese Informationen nicht in einer für den Produktentwickler geeigneten Form vorliegen.

PROBLEMLÖSUNG. Bionik

Das Forschungsprojekt CARPO verfolgt seitens des Methodeneinsatzes einen Lösungsansatz der, vor dem Hintergrund der Idee, dass Produktentwicklung und Biosystemanalyse auf der abstrakten Ebene des „Physical Modeling“ Schnittmengen besitzen, eine Übertragung eines sehr speziellen biologischen Phänomens in Technik herleitet. Es wird ein Verfahren weiterentwickelt und angewendet, das Skelettkinematiken von Wirbeltieren auf fluidisch beaufschlagte technische Tragflügel überträgt.

BIONIK. CARPO.

Das artifizielle Tragflügelsystem CARPO ist von der Fluid-Struktur-Wechselwirkung der elastisch-beweglichen Delfinhand inspiriert. Die „Hände“ der Wirbeltiere bilden kinematische Strukturen aus, die bei mechanischer Belastung adaptiv und selbstständig eine vorteilhafte Form einnehmen. Diese passive Belastungs-Formänderungs-Wechselwirkung der Mittelhandknochen (lat.: *Metacarpus*) kommt ohne kognitiven Aufwand des Wesens aus. Belastungsadaptive Designs nennen wir „intelligente Mechanik, i-mech“. Das Mittelhandknochensystem der Delfine stellt ein räumlich wirksames Gelenkgetriebe dar, in dem Strömungskräfte auf eine belastungsadaptive Formänderung der Struktur führen. Die sinnfällige Semantik der Funktionselemente macht das ordnende und das kinematische Prinzip des Biosystems sichtbar. Das Handgelenk rezenter Walartiger, Delfine und deren evolutionsbiologisch relevante Frühstadien die als Fossilien vorliegen, können als biologisches Vorbild für eine vielachsige (technische) Kinematik dienen. Das kinematische Wirkprinzip dieser technischen Vielachsen- Scharnier- Kinematik ist jenes von mehreren räumlich verbundenen, zwangsbewegten Klappen, deren (lokale) Scharnier-Drehachsen gemeinsame (lokalen) Schnittpunkte besitzen. Je nach Zuordnung der Freiheitsgrade der im Sinne einer kinematischen Kette ein (lokales) räumliches Getriebe bildenden Scharniere, stellen die zwangskinematischen dreidimensionalen Winkelbewegungen der Plattenebenen des kinematischen Systems ein Untersetzungs- oder eine Übersetzung dar. Bei mechanischer Beaufschlagung bilden die beschriebenen Gelenkplattenkinematiken abhängig von der Anordnung der Gelenk- und Fixationsebenen (Knick-) Gewölbeformen aus.

PRODUKTENTWICKLUNGSMETHODEN

In der industriellen Produktentwicklung ist ein Proof of Concept (POC), auch als Proof of Principle (POP) bezeichnet ein Meilenstein, an dem die prinzipielle Durchführbarkeit eines Vorhabens belegt ist. In der Regel ist mit dem Proof of Concept die Entwicklung eines Prototyps verbunden, der die benötigte Kernfunktionalität aufweist. Die Methodik und Handlungsweisen zur Entwicklung der Prototypen im Vorhaben CARPO.POC weist den hier vorgestellten Methoden zur industriellen Produktentwicklung äquivalente Lösungsmuster auf.

VORARBEITEN (BHT, Methoden in der Produktentwicklung)

Die Bionik verbindet Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften mit dem Ziel, Prinzipien der belebten Natur zu entschlüsseln und diese auf Technik zu übertragen. Seitens der Industrie besteht ein klares Interesse an Problemlösungen aus der belebten Natur. Für die erfolgreiche Übertragung biologischer Prinzipien auf technische Produkte und Verfahren bedarf es der Entwicklung von Methoden, Vorgehensweisen und Instrumenten, die den industriellen Produktentwicklungsprozess unterstützen. Traditionelle Produktentwicklungsverfahren betreffen Fragestellungen, mit denen möglichst alle Informationen erarbeitet werden, die für das Konzept, den Entwurf und die Erstellung von Fertigungsunterlagen eines Produkts notwendig sind, bis hin zur Einführung in den Markt. Bei der Übertragung von Kenntnissen der Biosystemanalyse auf Technik im Sinne der Bionik taucht das Problem auf, dass sich gerade die hochkomplexen, teilweise bis an die Grenze des physikalisch Machbaren optimierten biologischen Prozesse und Bauweisen einer unmittelbaren Transformation auf technische Fragestellungen entziehen.

Das avisierte Vorhaben CARPO.WELLS verfolgt einen Lösungsansatz vor dem Hintergrund der Idee, dass Produktentwicklung und Biosystemanalyse auf der abstrakten Ebene des „Physical Modeling“ Schnittmengen besitzen, aus denen sich Methoden zur Übertragung biologischer Phänomene in Technik herleiten lassen.

METHODEN DER BIOSYSTEMANALYSE. Die belebte Natur, die Art und Weise der Gestaltentstehung in der Biologie kann Vorbild sein für Artefakte und für Technik. In der Biosystemanalyse finden wir derzeit keine standardisierte Herangehensweise vor. Dafür sind die jeweiligen Fragestellungen zu speziell, die Vielfalt der betrachteten Systeme zu groß.

Werner Nachtigall liefert in seinem Standardwerk zur Biomechanik [19] einen Einblick in die Arbeitsweise der Biosystemanalyse vor dem Hintergrund bionischer Fragestellungen. Aber derartige ingenieurfreundliche Arbeitsverfahren sind rar. Die anatomische Zeichnung, die semiotische Deutung, das in Wort und Bild sehr umfangreich ausdifferenzierte Wissen über die funktionale und vergleichende Physiologie der Lebewesen, die gut analysierten biologischen Materialien und die hervorragend recherchierten allometrischen Zusammenhänge existieren durchaus, leisten aber nur einen geringen Beitrag zu einer „ingenieurmäßigen“ Herangehensweise der Übertragung biologischer Phänomene in Technik. So ist es um 2005 erneut Werner Nachtigall der damit beginnt, physikalische Effekte im Kontext

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

biologischer Gestalt in Katalogen zu systematisieren [20]. Die mechanischen Modelle sind vergleichsweise einfach, haben aber den Vorteil dass, von statistischen Auswertungen abgesehen, Taschenrechner oder bestenfalls Tabellenkalkulationsprogramme als Hilfsinstrument ausreichen.

Anders in der Humanmedizin und der Anthro-Biomechanik. Hier nehmen derzeit computer-basierte Simulations- Berechnungs- und Darstellungsverfahren (Computational Bioengineering) an Anzahl und Bedeutung rasant zu [21] und schließen sogar numerische Fluidmechanik mit ein. Als richtungsweisend auf dem Weg von der Bildgebung zur Simulation ist AnyBody© der Firma ANSYS anzusehen [22][23][24][25]. Die Entwicklungen auf dem Gebiet bildgebender Diagnose-verfahren in der Medizin versprechen für die Zukunft eine Kompatibilität zu CAD-Systemen [26]. Hinsichtlich der numerischen Simulation und Analyse der nicht-anthropologen belebten Natur (Pflanzen, Tiere) verläuft die Entwicklung nicht so rasant aber stetig [27]. Mit Spannung beobachten Bioniker derzeit die Ereignisse auf dem Gebiet der Computeranimationen für (Computer-) Spiele! Deren „Physic-Engines“ werden immer „physikalischer“, laufen während der Simulationen auf Physics Processing Units (PPU) und entlasten damit die Zentraleinheit von rechenintensiven Aufgaben. Berechnet und dargestellt werden physikalische Gesetze und Phänomene, statische und dynamische Körper, Fall-, Rotations-, Impuls- und Fließgesetze und Materialoberflächen. Von besonderem Interesse sind dabei Fragen der Berührungs- und Kollisionserkennung. Allerdings geht es bei Simulationsimplementierungen für Computerspiele nicht unbedingt um physikalische Exaktheit [28] [29].

METHODEN DER INDUSTRIELLEN PRODUKTENTWICKLUNG.

Produktentwicklungsmethoden betreffen Fragestellungen, mit denen die Informationen erarbeitet werden, die für das Konzept, den Entwurf und die Nutzung eines Produkts notwendig sind [30]. Strategien, Methoden und Verfahren für die Entwicklung industrielle Produkte unterscheiden sich nach Branchen, Art und Typ der Produkte, weisen aber gemeinsame Grundstrukturen auf. Ein übergeordneter Strategieparameter ist dabei die „Gestaltungsabsicht (Design Intent)“, die den gesamten Produktentwicklungsprozess von der Ideenfindung, über den Entwurf, die Konstruktion und die industrielle Fertigung bis hinein in die Produktbetreuung am Markt klammert.

Im avisierten Vorhaben CARPO steht ein Prototyp im Sinne eines Funktionsdemonstrators im Fokus der Entwicklung. Die methodische

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Herangehensweise, insbesondere der Einsatz performanter Simulationswerkzeuge ist der Entwicklung industrieller Produkte adäquat.

Problemorientierte und Produktorientierte Entwicklungsprozesse unterscheiden sich von einander, weisen aber eine gemeinsame Grundstruktur auf mit den Elementen:

- Aufgabenbeschreibung und Definition der Entwicklungsziele
- Konzepterstellung
- Erarbeitung von (Produkt-) Entwürfen
- Konstruktion, im Sinne der Erstellung von Fertigungsunterlagen
- Fertigung
- Vertrieb und Produktbetreuung am Markt.

Der Datenfluss in Produktentwicklungsprozessen wird von hochentwickelten Computersystemen (Hard- und Software) erzeugt, geordnet und genutzt. Der Begriff „Computer Aided Engineering, CAE“ fasst die Möglichkeiten der Computerunterstützung von Produktentwicklungsprozessen zusammen. Im Zusammenhang mit Bionic Engineering seien einige Elemente des CAE genannt:

- Rechnerunterstützte Konstruktion (Computer Aided Design, CAD)
- Mehrkörpersimulation (MKS)
- Mechanische Beanspruchung von Bauteilen und Baugruppen (FEM)
- Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD)
- Fluid- Struktur- Wechselwirkung (Fluid Structure Interaction, FSI)
- Ein- und Ausbauuntersuchungen, Kollisionsprüfungen (Digital Mock-Up, DMU)

Zur Erstellung physikalischer Modelle und der Simulation der Bauteil-Wirklichkeit sind MKS, FEM, CFD und (auf Laborebene) FSI bereits etablierte Verfahren. In der verallgemeinerten Dramaturgie der methodischen Produkterstellung liefern dann erste Studien über kinematische Beziehungen zwischen Bauteilen Entscheidungsgrundlagen bei der Erstellung von konkurrierenden Konzepten. Viele struktur- und fluidmechanische Effekte werden in vereinfachenden Modellvorstellungen, vermittelt durch MKS, FEM und CFD erst sichtbar.

Ein Konzept, als Element methodischen Vorgehens, soll neutral sein gegenüber der angestrebten Lösung. Bei stationären Vorgängen genügt die

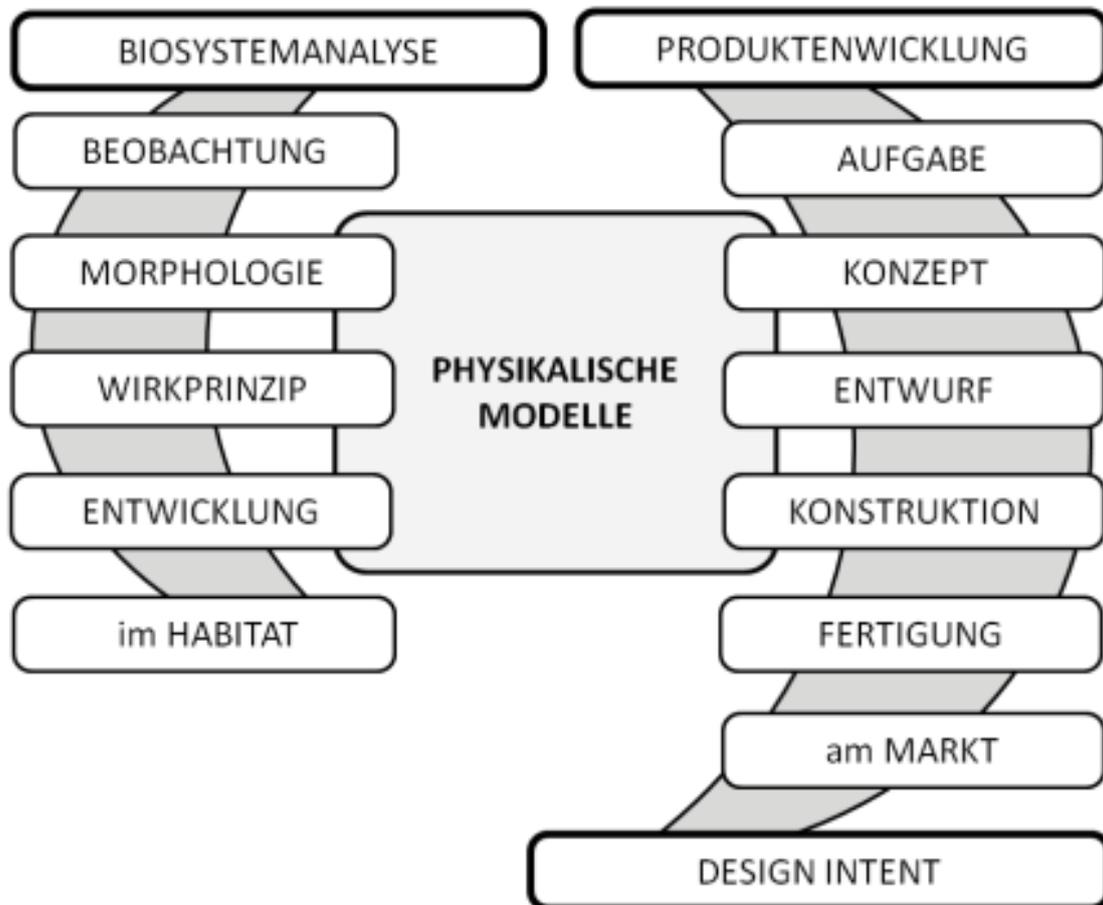
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Bestimmung der Eingangs- und Ausgangsgrößen, bei zeitlich sich verändernden instationären Vorgängen ist darüber hinaus die Aufgabe transient zu definieren. Dabei ist es zunächst nicht wesentlich zu wissen, durch welche Lösung eine solche Funktion erfüllt wird. Die Funktion wird damit zu einer Formulierung der Aufgabe auf abstrakter und lösungsneutraler Ebene. Das computerunterstützte Physical Modeling (MKS, FEM, CFD, FSI) stellt in dieser Phase Entscheidungsgrundlagen bereit, indem Parameterstudien qualitative Vorstellungen und erste quantitative Aussagen herstellen und visualisieren. Nun können zum Erfüllen der Gesamtfunktion die Wirkprinzipien der Teilfunktionen zu einer Kombination verknüpft werden. Das führt zur Wirkstruktur einer Lösung, in der das Zusammenwirken mehrerer Wirkprinzipien erkennbar wird und das Lösungsprinzip zum Erfüllen der Gesamtaufgabe angegeben werden kann.

Entwurf und Konstruktion. Die Verbindung von Programmsystemen zur Zeichnungserstellung (CAD) und Simulationsprogrammen (CAD und FEM) sind Stand der Technik. Allerdings herrschen immer noch große Unterschiede in der Art der Kopplung. Bei projektbasierten Verknüpfungen bilden CAD-Systeme die organisatorische Basis von der aus die Daten in das Berechnungs-Programmsystem „verschoben“ werden (müssen). Die Verluste an Informationen über Form und Funktion der anvisierten technischen Konstruktion stellen nicht selten ein gewichtiges Problem dar. Eine Problemlösung stellt die Initial Graphics Exchange Specification (IGES) dar, die ein neutrales herstellerunabhängiges Datenformat definiert, welches dem digitalen Austausch von Informationen zwischen CAE-Programmen dient. Der Trend geht heute eindeutig zu CAD-Systemen mit fest verdrahteten physikalischen Modellen die es gestatten, Baugruppen zu animieren, Bewegungsabläufe zu simulieren und mit integrierter Festigkeitsberechnungsfunktion Bauteilbelastungen schon während der Konstruktion zu analysieren. Dem Konstrukteur und dem Designer wachsen in Zukunft Kompetenzen zu, die vor einigen Jahren dem Berechnungsingenieur vorbehalten waren; das ist bemerkenswert. Für die konstruktionsbegleitende Berechnung bieten mehrere Softwareentwickler Produkte an, die sich intuitiv bedienen und nahtlos in alle gängigen CAD-Programme integrieren lassen. Aus der Sicht des Bionic Engineering ist eine rezente Entwicklung interessant. Die Entwickler hochperformanter Berechnungs- und Simulationssoftware nähern sich von ihrem Kerngeschäft aus der Lösung des Problems des Datenverlustes beim digitalen Austausch von Informationen. Die

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Berechnungsprogramme (FEM- und CFD- Solver) werden dabei mit leistungsstarken parametrischen Geometrie- Modelierern ausgerüstet.



Dies hat zur Folge, dass sich der Gestaltungsprozess förmlich umdreht: Aus dem Berechnungsergebnis auf der Grundlage der FEM- oder/und CFD-Software wird zukünftig Form, Geometrie und auch Funktion abgeleitet werden. Der Weg wird frei zu einer „automatisierten“ Gestaltentwicklung, sobald der Prozess in einer „geeigneten Umgebung“ stattfindet derart, dass die Gestaltungsparameter des CAD- Modelers zu den Objektvariablen einer Optimierungsstrategie werden. Das High-End dieser Konzepte sind freilich Berechnungsprozesse, die auf Algorithmen zur Optimierung hochdimensionaler komplexer fluidischer Systeme zielen, insbesondere der Berechnungen der Verformung elastischer Strömungskörper (FEM) des zugehörigen Strömungsgebietes (CFD) und der Kopplung der Simulation in einem gemeinsamen Ansatz (FSI). Derartige Simulationsmethoden sind bereits in der Erprobung. Für das Bionic Engineering sind diese Szenarien deshalb so

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

interessant, weil sie sich konzeptionell den biologischen (evolutiven) Gestaltfindungsvorgängen weiter annähern.

Simulationssoftware nimmt in den naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Berufsfeldern einen zunehmend größeren Anteil ein (organisatorisch, zeitlich und Kosten). In klassischen maschinenbaubetonnen Produktentwicklungsmethodiken, wie etwa der VDI-R 2221, werden bereits in der frühen Phase Wirkprinzipien und Funktionsmodelle nachgefragt; sie geben erste Auskünfte über Form und Art, Abmessungen, Anordnung und Anzahl der Gestaltungselemente eines frühen Entwurfs und bilden die Entscheidungsgrundlagen für die weitere Entwicklung. An Bedeutung gewinnen gegenständliche Modelle, die mit Rapid Prototyping-Verfahren (RP) direkt aus den CAD-Datenbeständen generiert werden können. Experimentieren mit gegenständlichen Modellen umfasst das ganze Spektrum sehr einfacher Tests bis hin zu aufwändigen Erprobungen mit Prototypen und Vorläuferprodukten. Gegenständliche Modelle werden beim Entwerfen insbesondere dann eingesetzt, wenn ein funktioneller oder visueller Gesamteindruck gewonnen werden soll. Beanspruchungsmodelle dienen der Klärung des Bauteilverhaltens bei äußerer Beanspruchung (statisch, dynamisch, Schwingung, isolierte Kräfte), Verformungs- und Funktionsmodelle zur Analyse des Bauteilverhaltens hinsichtlich Kinematik, Dynamik, thermischen, elektrischen und chemischen Verhaltens. Ergonomie-modelle und Anmutungen dienen zur Erprobung der Handhabung, Montage, Bedienung und von Nutzungsszenarien im Anwendungsfeld sowie zur Vermittlung eines realistischen Eindrucks über die visuellen Eigenschaften des späteren Produkts, auch dessen Haptik. CAD-Systeme bilden somit einerseits den Kern der computerintegrierten und datendurchflossenen Fabrik (CIM), andererseits sind sie Pre- und Postprozessor für die direkte rechnerische Behandlung des entworfenen Bauteils. Je früher in der Produktentwicklung physikalisch belegte Modelle existieren, umso höher ist ihr wirtschaftlicher Nutzen.

VORARBEITEN

VORARBEITEN (BHT, Bionik und Intelligente Mechanik, i-mech)

Die Bionic Research Unit ist die forschungsbezogene fachgruppe für Bionik an der Beuth Hochschule für Technik. Die Forschungsvorhaben der Bionic Research Unit behandeln in erster Linie Themen zur „Intelligenten Mechanik“ in Natur und Technik. Anfangs wurden biologistische Hintergründe geklärt, an der Wirkungsweise von Fischflossen die prinzipielle Lösung für eine autoadaptive Tragfläche herausgearbeitet und erste intelligente Kinematiken entworfen (Forschungsprojekt FlowBow / Laufzeit 09/2004 bis 08/2005 [MIR-05]), die numerischen Grundlagen erarbeitet (Forschungsprojekt „i-mech“, Laufzeit 10/2007 bis 04/2008 [Kreb-08][Kreb-08-1]) und einfache Systeme mit Fluid-Struktur-Wechselwirkung untersucht (Forschungsprojekt „Bionics and Morphological Computation (BMC)“, Laufzeit 09/2008 bis 02/2010 [Sie-10][Sie-11]). Im Rahmen des Kooperationsprojektes „Hochschulbasierte Weiterbildung in Betrieben“ wurden numerische Verfahren der Simulation strömungsadaptiver Profile weiterentwickelt (Forschungsprojekt „i-mech3“, Laufzeit seit 02/2011 bis 08/2013 [Voss-12-1][Voss-12-2][Voss-13][Barg-11]) und in einem weiteren Forschungsprojekt auf Tragflächen angewendet (Forschungsprojekt „AdaptivFoil“ Laufzeit 05/2012 bis 10/2013 [Ost-13]). Ein abgeschlossenes Kooperations-Forschungsprojekt mit der Technischen Universität Berlin (Forschungsprojekt „FinTec“ / Laufzeit 10/2013 bis 04/2016) behandelte im Rahmen einer von der BeuthHS geführten kooperativen Promotion den Einsatz intelligenter Mechanik in Nachleitapparaten von Strömungskraftmaschinen. In einer rezenten Industriekooperation mit dem Germanischen Lloyd DNV-GL, erforschen wir den Wellenwiderstand modellierter biologischer Halbtaucher mit potentialtheoretischen Methoden (Forschungsprojekt „Into FS-Flow“ / Laufzeit seit 3/2014). Allen Projekten ist als übergeordnetes Ziel die Klärung des Beaufschlagungs- Verformungsgebarens intelligenter Kinematiken in der Biologie und der Fluid-Struktur-Wechselwirkung strömungs-beaufschlagter technischer Systeme gemein. Im Zuge der Forschung zur „intelligenten Mechanik“ biologischer und technischer Systeme wurden seit 2004 der BeuthHS zahlreiche Erfindungen (gemäß ArbNErfG) angezeigt und einige davon (etwa 60) als Patente oder Gebrauchsmuster angemeldet. Das Deutsche Patent PTC/DE2010/075164, das Europäische Patent EP: 10809144.8, das US Patent US-Pat. 13/517,181 und das Internationale Patent WO: PCT/DE2010/075164, IPC: B63H (2012.01) beschreiben Gestaltungsprinzipien belastungsadaptiv ausgeführter Bauteile. Das Gebrauchsmuster GM 20 2009 008 234.2, IPC F01D 5/28 hat adaptive

kinematische Segmente für bewegliche Statorschaufeln von Vorleitapparaten in Strömungsmaschinen zum Inhalt. Einige der Veröffentlichungen und Anmeldungen der Bionic Research Unit erwiesen sich als fachübergreifend relevant für die an technischen Anwendungen orientierte Forschung.

VORARBEITEN (BHT, Biosystemanalyse)

Mechanisch nichtorthodoxe Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Der kontrolliert struktur-flexiblen Verformung von Strömungsbauteilen räumen wir eine hohe Zukunfts- und Innovationsfähigkeit und damit einem hohen Stellenwert in unseren rezenten Forschungsbemühungen ein. Intelligente Mechanik (i-mech) in Repellertragflächen bedarf aber noch eines weiteren (innovativen) Schrittes hin zu einer nichtorthodoxen „intelligenten Fluid-Struktur-Wechselwirkung.

Werfen wir hierzu einen Blick auf die belebte Natur. Die teilweise bis an die Grenze des physikalisch Machbaren optimierte Gestalt vieler Lebewesen tritt nicht selten mit einer von Einfachheit getragenen Eleganz auf. Eingedenk der Komplexität der Lebewesen ist es für einen Konstrukteur bemerkenswert biologischen Gestaltungslösungen zu begegnen, die sich im Laufe der Evolution zu Konstruktionen entwickelt haben und weitestgehend selbstständig und mit geringstem kognitivem und strukturellem Aufwand komplizierte Aufgaben erfüllen.

Strahlenflosser¹⁵ sind eine sehr erfolgreiche Klasse der Knochenfische¹⁶, die mit ca. 30.000 bekannten rezenten Arten über 96 Prozent der lebenden Fischarten und damit etwa die Hälfte aller beschriebenen Wirbeltierarten stellen. Die Anatomie und die Mechanik ihres Bewegungsapparates war in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen, dennoch wird die Vielfalt von Funktion und Design der namensgebenden Flossenstrahlen, ihr evolutiver Werdegang, das individuelle Wachstum und die Differenzierung während der Individualentwicklung derzeit wenig erforscht. Zumindest vor dem Hintergrund einer Übertragung ihrer kinematischen Problemlösungsprinzipien auf Technik.

Betrachtet man die Fischflosse im Kontext des Fischkörpers, so sind Flossenstrahlen Teil des Wirbeltierskeletts, welches eine Schar fester, gelenkiger (Skelett-) Elemente bildet, die in Zusammenarbeit mit den Muskeln

¹⁵ Actinopterygii. Strahlenflosser (Actinopterygii) sind eine Klasse der Knochenfische (Osteichthyes).

¹⁶ Osteichthyes. Knochenfische (Osteichthyes) oder Knochenfische im weiteren Sinne sind diejenigen Fischgruppen, deren Skelett im Gegensatz zu dem der Knorpelfische (Chondrichthyes) vollständig oder teilweise verknöchert ist. Von den Osteichthyes sind die Knochenfische im engeren Sinne, die Echten Knochenfische (Teleostei), zu unterscheiden.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

für die Fortbewegung des Wesens wichtig sind. Die sichtbare Membran der Fischflosse wurde im Laufe der Evolution möglicherweise ursprünglich nur von dermalen Schuppen in der sie bedeckenden Haut gestützt. Die Flossen höher entwickelter Knochenfische werden im inneren Bereich durch eine Reihe schlanker Flossenstrahlen stabilisiert. Grundsätzlich sind die Flossenstrahlen der Knorpelfische schlank, nicht gegliedert und elastisch. Die Flossenstrahlen der Knochenfische sind gegliedert, proximal paarig, distal verzweigt und verknöchert. Sie werden evolutionsbiologisch von Schuppen abgeleitet beschrieben [W-06][W-06][Hild-01]. Die Schwanzflosse der Strahlen-flosser wird innerhalb ihrer fleischigen Basis von mehreren Fortsätzen unterstützt und dient den Fischen zur Vortriebskraftherzeugung, zur Stabilisierung der antriebslosen geradlinigen Fortbewegung und zum Manövrieren. Wenn das Tier in seiner fluidischen Umgebung Inhomogenitäten auffindet, also ein Geschwindigkeitsfeld respektive einen geeigneten Druck-gradienten, kann es dies zur eigenen Mobilität nutzen, indem es sich im Zickzack von Wirbel zu Wirbel hangelt und für diese Art der Fortbewegung nur relativ geringe Muskelkraft aufwendet. Das Zusammenspiel und Wechselwirken von in einer Strömung transportierten Wirbeln mit einer Flossenmembran ist ein grundsätzliches Phänomen wirbel- und inversions-behafteter Strömung und Gegenstand der Analyse der aktiven und passiven Wirbelkontroll-mechanismen von Wasserlebewesen. Die Prinzipien der Wirbelkontrolle sind von großer Bedeutung für das Verständnis, wie Fische schwimmen und manövrieren. Ein harmonisch oszillierender Tragflügel kann in einer mit großen Wirbeln behafteten Strömung vorteilhaft interagieren und Schub erzeugen, wenn sowohl die Wirbelgröße und die Frequenz des harmonisch oszillierendes Profil in der Strömung fitten. Fluid-Struktur-Interaktion von flexiblen Körpern in wirbelbehafteten Strömungen ist Gegenstand der rezenten Forschung [Gopa-94][Read-02][Ande-99][Albe-09][Liao-06][Tria-02][Floc-09][Stre-96].

Die Fluid-Struktur-Wechselwirkung beim Impulsaustausch mit dem Fluid über die Membrantragfläche der Fischflosse, kann produktiv oder generativ sein. Bei einer produktiven Wechselwirkung arbeitet die Flossenmembran als Krafttragfläche und koppelt Energie aus der Strömung in die Membran ein. Bei einer generativen Fluid-Struktur-Interaktion wirkt die Flossenmembran als Arbeitsfläche und koppelt Energie aus der Struktur in das Fluid ein. Produktion und Generation können in einem zeitlich-örtlich ineinander verschränkten, komplexen Gesamtgeschehen stattfinden. Anders als in der Technik, wo der Energie- und Informationsaustausch an Kraft- und Arbeitstragflächen vergleichsweise eindeutig beschrieben und zugeordnet werden kann, stellen

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

sich biologische Tragflügel-konstruktionen als komplexe, zur Rückkopplung und zur Adaption fähige Multifunktions-systeme dar. Diese sind optimiert und in der Lage, ihre fluidische Umgebung zu kontrollieren, gestaltend auf sie einzuwirken und sie für ihre Transport- und Mobilitäts-belange zu konditionieren derart, dass das Lebewesen den zeitlichen Ablauf seiner Körperbewegung so ausführt, dass der genezierte Wirbel die in seiner Umgebung vorgefundenen Struktur vorteilhaft ergänzt. Dabei haben Periodizität, Frequenz, Phase und Drehrichtung der von in einer Strömung zu einer Flossenmembran transportierten Wirbelgebilde erheblichen Einfluss auf die Qualität der Fluid-Struktur-Wechselwirkung mit der Flossenmembran [Die-15-3]¹⁷.

Ist der Impulsaustausch an der Membranoberfläche groß, verhält sich die biologische Flosse biegenachgiebig-elastisch und weicht einer transversalen Anströmung aus. Die Beaufschlagungs-Formänderungs-Wechselwirkung verhält sich kausal gegenüber beaufschlagen-den Krafrichtung und im Sinne eines konventionellen Belastungs- Verformungsregimes mechanisch „orthodox“. Im Normalbetrieb aber, technisch gesprochen also „im Auslegungsbereich des Strömungsbauteils“, führen die Flossenstrahlen passiv eine elastische, konkave Verformung aus, deren Krümmung der Belastungsrichtung entgegen-gerichtet ist. Hier zeigt die Fischflosse ein „mechanisch nichtortho-doxes“, ja paradoxes Verformungsgebaren und eine der Krafteinleitungsrichtung entgegen-wirkenden Verformung realisierende Belastungs-Formänderungs- Interaktion. Die Ursache der nichtorthodoxen Krümmung biologischer Flossenmembranen findet sich im bemerkenswerten Design der biegeflexiblen Innenstruktur der Flossenstrahlen, einer Schar regelmäßig von durch Stege verbundenen, durch ein plastisch verformbare Inlets gedämpfte und mit Flossenhaut ummantelte Halbtubensysteme. Aus der Sichtweise der Bionik stellten strömungsadaptive Tragflächenprofile nach dem Vorbild fluidischer Biosysteme grundsätzlich eine Möglichkeit der passiven Strömungskontrolle dar. Dies führte in der vergangenen Dekade zu einer ambitionierten Erforschung der „intelligenten Mechanik“ biologischer und technischer Flossensysteme. In mehreren Forschungsvorhaben der Beuth Hochschule für Technik Berlin wurden seit 2006 die biologistischen Hintergründe "intelligenter Mechanik" betrachtet, an der Wirkungsweise biologischer Flossen die „prinzipielle Lösung“ für artifizielle autoadaptive Profile herausgearbeitet, erste technische Kinematiken entworfen [MIR-05], numerische Lösungsansätze erarbeitet [KRE-08], Systeme mit Fluid-Struktur-Wechselwirkung untersucht [Sie-10], [Sie-11] und Patente

¹⁷ Dienst, Mi. (2015). Zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung biologischer Finnen. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (eBook): 978-3-668-00166-4, ISBN (Buch): 978-3-668-00167-1.

für belastungs-adaptive Bauteile angemeldet [USP-12][DEP-11]. Da zu dieser Zeit numerische Modelle der Fluid-Struktur-Wechselwirkung nur für ausgesuchte Randbedingungen existierten, wurde im Rahmen der Forschungskampagne eine Prozesskette entwickelt, welche die Lösungen von Körperverformung (Finite Element Methode, FEM) und Strömungsgebiet (Computational Fluid Dynamics, CFD) in einem gemeinsamen Simulationsansatz unter den speziellen Bedingungen hochkomplexer dynamischer Außenströmung miteinander koppelt (Fluid Structure Interaction, FSI). Die Simulations- und Berechnungsergebnisse bildeten die Basis für den Entwurf realer Strömungsbauteile mit intelligenter Mechanik.

VORARBEITEN (BHT, Biosystemanalyse)

Die Von der Delfinhand zu kinematischen Grundfiguren

Neben der Mechanik der strömungsadaptiven Flossenstrahlen der Fische drängt derzeit ein weiteres biofunktionales, passiv-adaptives Bewegungssystem in den Fokus weiterreichender Untersuchungen der BIONIC RESEARCH UNIT¹⁸: Das Mittelhandknochensystem der Wirbeltiere. Die Tetrapoden¹⁹ haben sich im oder nahe dem Süßwasser entwickelt. Mit ihren starken Flossen konnten sie an Land Nahrung finden und aquatischen Feinden entkommen. Fossilien amphibienähnlicher Fische und fischähnlicher Amphibien liefern Deutungsmodelle für die Entwicklung der Flossen hin zu einem für das Leben auf dem Festland geeigneten Bein. Die allmähliche Verwandlung der Flossen zu Gliedmaßen verlangte einen morphologischen Umbau, den Verlust der Flossenstrahlen und die Ausbildung von Fingern. Der Übergang aus dem Wasser an das Land und die Geschichte des Gestaltwandels der Wirbeltiere ist Gegenstand der einschlägigen Literatur (Neil Shubin²⁰ „Your inner Fish“) und soll aber an dieser Stelle nicht erzählt werden. Die verschlungenen Wege der biologischen Evolution führte einige Wirbeltiere zurück ins Wasser.

Die modernen Wale entwickelten sich vor 30-40 Millionen Jahren. Entwicklungsmorphologen sind sich heute nicht mehr so ganz sicher, ob primitive Huftiere des Eozäns die Urväter modernen Wale (Cetacea) und

¹⁸ Die BIONIC RESEARCH UNIT ist die forschungsbezogene Fachgruppe für Bionik an der Beuth Hochschule für Technik Berlin. <https://projekt.beuth-hochschule.de/bru/>

¹⁹ Tetrapoda (*tetra* ‚vier‘ und *pod-* ‚Fuß‘) fasst in der biologischen Systematik die Wirbeltiere zusammen, die vier Gliedmaßen (Extremitäten) haben. Zu diesen Vierfüßern gehören die Amphibien (Amphibia), die Reptilien (Reptilia), die Vögel (Aves) und die Säugetiere (Mammalia) einschließlich des Menschen. Es zählen etwa 26.700 Tierarten zu den Tetrapoden. Nach: <https://de.wikipedia.org/wiki/Landwirbeltiere>

²⁰ Neil Shubin (2009). Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body, Vintage Verlag. ISBN-10: 0307277453, ISBN-13: 978-0307277459

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Walartigen waren. Neuste Untersuchungen legen die Vermutung nahe, dass Fleisch fressende Urhuftiere, die in ihrer Gestalt Wölfen ähnelten, zur Jagt mehr und mehr Küstengewässer, Flussmündungen und das Meer aufsuchten und eine aquatische Lebensform annahmen.



Abb.: Präparat einer „modernen“ Delfinhand. Naturkundemuseum Berlin, Mi.Dienst 2013.

Der früheste bekannte Urwal *Pakicetus* lebte vor etwa 53 Millionen Jahren. Sein Schädel weist (noch) große Gemeinsamkeiten mit denen der Landtiere auf. Nach und nach wandelt sich im Laufe einer einzigartigen Evolutionskampagne das Skelett des Säugetiers und es entwickelt eine stromlinien-förmige Körperkontur, der Verlust seines Haarkleides geht einher mit der Ausbildung der wärmedämmenden und strömungs-elastischen Speckschicht (Blubber), die Vordergliedmaße bilden sich zu Flossen (Flippers) um, Hintergliedmaße und Beckengürtel bilden sich zurück. Fluke und Finne sind Neuerfindungen in der Phylogenie der Meeressäuger. Die Skelette der Vordergliedmaßen der Wale und Walartigen tragen den typischen Aufbau der Säugerhand. Der Oberarm ist kompakt, Fibula und Tibia sind verflacht. Die Finger sind verschieden lang, tragen 4 bis 12 Segmente und können sogar innerhalb eines Individuums unterschiedlich sein. Bei einigen Arten werden die Mittelhandknochen überhaupt nicht ausgebildet. Eine nähere Betrachtung der Hände der Meeressäuger offenbart das generale Grundmuster der Vertebratenhand und seine potentiellen geometrischen und funktionalen Spielarten.

Die Skelettbaupläne der Handwurzel der Wirbeltiere variieren ein gemeinsames Grundmuster; evolutionäre Gestaltänderung erfolgt insbesondere durch Skalierung und Reduktion. Die Knochen des Handgelenks bilden den

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Carpus. Bei der Individualentwicklung entsteht das Skelett der Wirbeltierhände aus knorpeligen Elementen innerhalb der sich entwickelnden Gliedmassenknope, die sich in einer Reihenfolge von proximal nach distal aus Vorläuferelementen bilden. Wir wissen heute, dass die Finger der Wirbeltierhand nicht durch eine Umwandlung der evolutionsgeschichtlich vorausgehenden Fischflossen entstanden, sondern eine Neuerfindung der Tetrapoden sind. Auf den ersten Blick scheinen Arme und Hände der modernen Wirbeltiere wenig mit den Brustflossen der Fische verwandt.

Doch bei näherer Betrachtung erscheint auch hier eine Variation des generalen Grundmusters der Vertebratenhand. Das Handgelenk des Menschen wird von den Morphologen schematisch als ein verzahntes Scharniergelenk beschrieben. Wegen seiner räumlich gewölbten Form und bedingt durch Bänder und Gelenkkapseln ist die Beweglichkeit begrenzt.

Die Interkarpalgelenke bezeichnen die gelenkigen Verbindungen der Handwurzelknochen einer Reihe untereinander. Sie sind so genannte Wackelgelenke, die durch zahlreiche Bandzüge versteift und kaum beweglich sind. Die Karpometakarpalgelenke bezeichnen die Verbindung der distalen Handwurzelknochen mit dem zweiten bis fünften Mittelhandknochen. Der oben verwandte Terminus der Karpometakarpalgelenke als „verzahnte Scharniergelenke“ weist auf eine prinzipielle Lösung als Grundlage für eine Überführung in artificielle Bewegungssysteme.

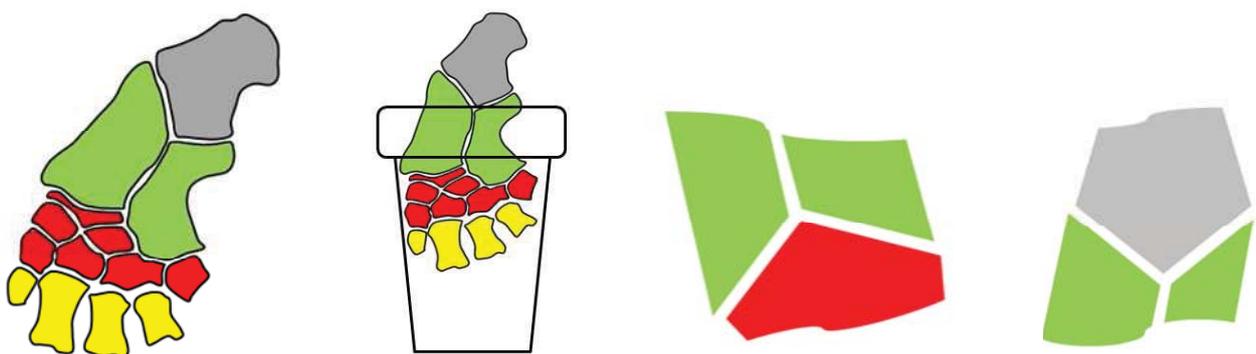


Abb.: Schematisierung der Meeressäuger-Hand: Metacarpala (gelb); Centralia, Carpalia (rot); Fibula, Tabia (grün); Femur (grau), links im Bild. Eine „Phantasie-Repeller-Tragfläche“ (Mitte). Gelenkprinzipien: Beugen und Spreizen (zwei Skizzen rechts im Bild).

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Die Kinematik der Wirbeltierskelette und insbesondere der Mittelhandknochensystem sind derzeit noch nicht hinreichend geklärt und das Beaufschlagungs-Bewegungsgebaren räumlicher Komplexgetriebe aus diskreten Gelenken und strukturelastischen Elementen bleibt wenig erforscht. Versuchen wir eine erste Schematisierung des Komplexgetriebes der Wirbeltier-Mittelhand. Als Grundlage einer semantischen Analyse der Wirbeltierextremität dient eine schematische Darstellung der Hand eines Schweinswals nach H.G. Seeley²¹. Die Schematisierung der Meeressäuger-Hand Abb.5. zeigt die funktionalen Elemente-Gruppen Metacarpala (gelb); Centralia, Carpalia (rot); Fibula, Tabia (grün); Femur (grau), im linken Teil der Darstellung. Daraus werden zwei Gelenkprinzipien extrahiert: Beugen (mittig) und Spreizen (rechts in der Abb.).

Vorarbeiten CARPO-PRINZIP

Die Schaufeln (Tragflächen) der Wellsturbinen besitzen in der Regel symmetrische Profile. Im Betrieb bilden diese symmetrisch profilierten Tragflächen dann Querkraft generierende Systeme, wenn die Anströmung nichtaxial erfolgt. Die Variation des Lifts eines symmetrischen Profils über den Anstellwinkel ist selbst symmetrisch. Die aus dem aerodynamischen Auftriebsgebaren der Tragfläche resultierende Querkraft wird von der Maschine in mechanische Energie gewandelt. Ihre Krafttragflächen sind fluidmechanisch wirksame Tragflügel die dem bewegten, umgebendem Fluid (vornehmlich) Energie entziehen (im Gegensatz zu den Arbeitstragflächen die primär Energie in ein umgebendes Fluid einkoppeln). Sobald die Strömung an einer symmetrischen Turbinentragfläche einen gewissen Geschwindigkeitsanteil in Querrichtung enthält, arbeitet diese profilierte (Kraft-) Tragfläche und ist in ihrer physikalischen Wirkung selbst verstärkend, also „auto-reaktiv“. Diese wunderbare Eigenschaft kennzeichnet das „Wesen eines Tragflügels“ an sich, sie ist systeminhärent. Von der Güte einer Repellertragfläche hängt die Intensität und die Bandbreite dieser „wesentlichen Eigenschaft“ ab. Nicht ausschließlich, aber in der überwiegenden Mehrheit aller Produktentwicklungen im industriellen Bereich ist eine möglichst große Intensität tragender Anteil der Entwicklungs- und Gestaltungsabsicht, des Design Intents und ist letztlich ein Performance-Kriterium für das avisierte Produkt. Grundsätzlich gilt, dass auf die Querkraftleistung einer Kraft- und

²¹ Hand eines Schweinswals. Schematische Darstellung; nach: Seeley, H. G. (2011) Dragons of the Air, An Account of Extinct Flying Reptiles, [PROJECT GUTENBERG EBOOK #35316] ISO-8859-1. In: <https://archive.org/details/cu31924003932591>.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Arbeitstragfläche kennzeichnende Auftriebsgebaren einer Profilkontur eine Vielzahl von Konstruktions- und Betriebsparametern Einfluss haben. Neben der Querkraftleistung einer Kraft- und Arbeitstragfläche interessieren die Robustheit der Konstruktion und die fluidmechanischen Verluste im Betrieb. Im Allgemeinen setzt sich der strömungsmechanische Widerstand einer Repellertagfläche aus drei Partialwiderständen, den Reibungs- und Formwiderstandsanteilen sowie den auftriebsbedingten so genannten induzierten Widerstand zusammen. Für das Flügelende, insbesondere den Randbogen (die Kontur des von der Turbinenwelle abweisenden, freien Repeller-Flächenendes), ist bei den wandnah arbeitenden Tragflügelenden einer Wellsturbine kein Gestaltungsparameter. Liegt der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit in der Erhöhung der Querkraftleistung der Tragflügelfläche, liefert eine größer skalierte Tragfläche bei gleichem Strömungsprofil mehr Querkraft. Ist die Skalierung nichtisotrop, wird etwa die Umrissgestalt und/oder der Schlankheitsgrad der Tragfläche variiert, ändert sich das Bild. Bei konstanter, gleichbleibender Tragflügelgestalt, kann der Konstrukteur Einfluss nehmen auf die Oberflächenbeschaffenheit. Für schlanke Körper wie Tragflügel, ist der Anteil der Reibung erheblich. Reibung wird in erster Linie durch den Charakter der wandnahen Strömung am Tragflügel bestimmt; diese kann laminar oder turbulent sein. Im Betrieb ist die Fähigkeit einer Tragfläche entscheidend, eine nicht axiale Anströmung in Querkrafterhöhung umzusetzen. Einer symmetrischen Repellertragfläche vom Stand der Technik gelingt das gut, einer Tragfläche mit nichtsymmetrischem Tragflügelprofil gelingt das besser (immer dann, wenn sie von der „richtigen“ Seite angeströmt wird). Es ist sinnfälliger, dass eine symmetrische Repellertragfläche bestens geeignet ist, eine beidseitig Beaufschlagung auch in beide Richtungen gleichermaßen zu beantworten; dieser „querkraftfreie Betrieb“ einer Repellertragfläche heißt: die neutrale Phase.

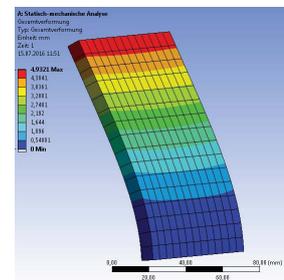
Das Strömungsprofil bezeichnet die Form eines Strömungskörpers in Strömungsrichtung des umgebenden Fluids. Die Kontur eines Strömungsprofils bezeichnet die umhüllende Gestalt des Strömungskörpers. Für die Profile rezentere Repellertragflächen wird in der Literatur und insbesondere bei den Praktikern auf NACA-Profilreihen verwiesen²². Für Kraft- und Arbeitstragflächen wird in der Regel eine mechanisch starre Form, ein deklaratorisch definiertes Profil und eine nichtflexible Kontur angestrebt. Die Profile von Kraft- und Arbeitstragflächen sind in der Regel entweder definiert symmetrisch oder definiert asymmetrisch. Im Betrieb erreichen Kraft- und Arbeitstragflächen

²² <http://users.tpg.com.au/users/mpaine/thesis.html#nacadata>. Und tatsächlich weist das von einer Finne der Firma FUTURES abgeformte Profil eine hinreichende Übereinstimmung mit einem Profil aus der vierstelligen NACA-Reihe auf.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

nach Stand der Technik mit starren Profilen das Maximum an Effizienz in einem fest umschriebenen Betriebspunkt. Da aber Kraft- und Arbeitstragflächen in Strömungsmaschinen außerhalb dieses relativ eng umrissenen Zustandsbereichs (Off-Design) nicht optimal arbeiten, sind die Energieverluste erheblich.

Die elastische Repellertragfläche. Forschung an Repellertragflächen im avisierten Vorhaben CARPO ist insofern einzigartig, weil hier nicht mit Modellen im Strömungskanal und mit skalierten Funktions- und Technologiedemonstratoren gearbeitet werden muss, sondern Originale Gegenstand der Untersuchungen sind. Für uns²³ zumindest ist dies ein Novum. Repellertragflächen für Wellsturbinen nehmen in der Familie der Kraft- und Arbeitstragflächen auch deshalb eine Sonderstellung ein, weil als etablierte Werkstoffe, bis auf einige exotische Ausnahmen, keine Kunststoffe infrage kommen (welche eine gewisse Elastizität aufweisen).



Im Forschungsvorhaben CARPO interessieren wir uns aber vornehm für die von einer strukturellen Elastizität der Repellertragfläche herrührenden Gestaltänderungseigenschaften im Betrieb. Die (ebenfalls strukturelle) Verformungsantwort einer durch ein strömendes Fluid beaufschlagten Tragfläche erscheint auf den ersten Blick offensichtlich.

Lässt man das Widerstandsgebaren einer fluidisch beaufschlagten Tragfläche unberücksichtigt, stehen die Querkräfte senkrecht auf der Finnenoberfläche, was die Berechnung einer Strukturverformung vereinfacht. Der aus dem Strömungsdruck zu erwartenden physikalische Input schätzen wir als nicht besonders groß ein und erwarten eher geringe Verformungen an der belasteten Struktur.

Mechanisch orthodoxe Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Sich elastisch verformende Bau- und Wirkungsweisen verhalten sich „mechanisch orthodox“. Tragflügelstrukturen, die unter Belastung ein orthodoxes Beaufschlagungs-Verformungs-Verhalten aufweisen, bilden weg-flexende, konvexe Form aus. Sich mechanisch nichtorthodox verhaltende Tragflügelstrukturen bilden eine konkave Form aus. Die Ursache für unter Belastung orthodoxes Beaufschlagungs-Verformungs-Verhalten kann eine eigentümliche Kinematik der Tragflügelstruktur sein. Bauteile, die so konstruiert sind, dass sie sich im Betrieb

²³ Die BIONIC RESEARCH UNIT im Fachbereich Maschinenbau der Beuth Hochschule Berlin.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

mechanisch nichtorthodox, belastungsadaptiv verhalten, nennen wir „Strukturen mit intelligenter Mechanik“²⁴.

Die Verformung der Tragflächenstruktur hat Einfluss auf das Leistungsvermögen der Repellertrafläche. Verformt sich die Tragfläche orthodox, also krümmt sich die unter fluidischer Druckbelastung stehende Struktur in der gleichen Richtung wie die beaufschlagende Strömung, könnte das „Wegflexen“ der Tragfläche (theoretisch) dann durchaus vorteilhaft sein, wenn das elastische Verhalten Betriebssicherheit realisiert und im Belastungsfall die verformte Tragflügelstruktur einen Auftriebsvektor liefert, der Vertikalanteile besitzt. Elastische Finnen sind fehlertolerant. Bei hoher Belastung speichert eine elastische Tragfläche die eingetragene Energie als Strukturverformung zwischen. Solange die Turbinenschaufel das mechanisch aushält, ist das ein Vorteil, da wir die Verformungsenergie wieder zurückbekommen und zwar mit einem sensationell hohen Wirkungsgrad von über 90%. Theoretische Untersuchungen zeigen, dass sich mit einer Profilkontur, die unter fluidischer Belastung eine konkave Gestalt annimmt und keine konvexe (wie die oben genannten Tragflächen vom Stand der Technik), die Leistungsmerkmale der Profilkontur und damit des gesamten Tragflügelsystems verbessern können²⁵. Für die Berechnungen steht ein leistungsfähiges, auf der Potentialtheorie basierendes und mit einem Reibungsansatz erweitertes CFD-Programmsystem der Firma MH Aerotools²⁶ zur Verfügung, das auch graphische Darstellungen der Umströmung der untersuchten Tragflächenprofile generiert. [W-4][W-5].

Vorarbeiten CARPO Probenkörper

Beim biologischen System stammt die Gelenkigkeit des räumlichen Getriebes aus der Elastizität in den Lagerungen. Gleichsam bilden mehrere Segmente elastische Cluster, deren Elemente ihrerseits mit beweglichen Kantengelenken

²⁴ Siewert, M; Kleinschrodt, H-D; Krebber, B; Dienst, Mi. (2010) FSI- Analyse auto-adaptiver Profile für Strömungsleitflächen. In: Tagungsband, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting Aachen 2010.

²⁵ *Ein Beispiel: Eine ebene Platte hat bei einem Anströmwinkel von 10 [°] einen Auftriebsbeiwert von etwa $CL = 1.0[-]$. Eine konkav gewölbte Platte hat bei einem Anströmwinkel von 10 [°] einen Auftriebsbeiwert von $CL > 1.4[-]$. Eine konvex gewölbte Platte hat bei einem Anströmwinkel von 10 [°] einen Auftriebsbeiwert von $CL < 0.7[-]$.*

²⁶ MH Aerotools: Dr. Martin Hepperle, Braunschweig, Germany was Assistant at Prof. Dr. R. Eppler's Institute A of Mechanics at the University of Stuttgart, later Scientific staff member at the Institute of Aerodynamics and Fluid Technology at the DLR in Braunschweig. *JavaFoil* is a new implementation of the previous *CalcFoil* program, written for web pages using the "C" language.

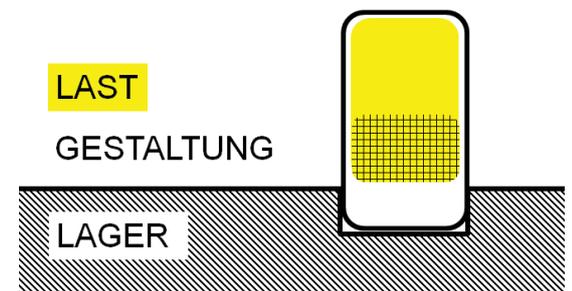
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

koppeln. Von der kinematischen Idee elastischer Gelenke wollen wir uns für die Dauer einer ersten Gestaltänderungs-Simulation trennen. Ziel ist, die Funktions-ursachen und kinematischen Eigenschaften artifizierlicher Kinematiken, die in der Art dreidimensionaler Getriebe arbeiten, zu untersuchen. Wir definieren einen schematischen Probenkörper und ermitteln das Verformungsverhalten unter Last. Es sind einfachste mechanische Modelle die mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) analysiert werden sollen. Sie liefern erste Erkenntnisse über das Beaufschlagungs-Verformungsgebaren räum-licher Komplexgetriebe aus diskreten Gelenken mit strukturelastischen Elementen.

Das Gestaltungsprinzip aus der Phänomenologie der Mittelhandknochen prognostiziert eine Beaufschlagungs-Verformungs-Erwartung der Tragflügel-fläche immer dann eine bevorzugte Wölbform annehmen, wenn die Gestaltänderung

mit der über die Lager vermittelten nach Lee gerichteten zwangskinematischen Strukturbewegung des Gesamtsystems erkaufte wird. Gesucht wird ein Beaufschlagungs-Verformungsgebaren, das eine konkave Tragflächenwölbung hervorbringt. Ein erstes strukturelles Ersatzmodell für ein Platten-gelenkgetriebe ist hier ein Systemprobenkörper, an dem einige wenige grundlegende geometrische Parameter variiert werden. Die Grundabmessungen (Tragflügelhöhe h , Tragflügelprofilkontur und Profiltiefe t) des Probenkörpers sollen entlang einer Simulationskampagne konstant sein. Der grundsätzliche Aufbau des Probenkörpers zeigt eine (Ersatztragflügel-) Fläche, die mit einer zunächst konstanten Druckbelastung (LAST) beaufschlagt werden kann. Die Probe sei im Wurzelbereich (nichtelastisch) gelagert (LAGERUNG). Die Untersuchungen gehen der Frage nach, welchen Einfluss Gelenkanordnungen auf die Wölbverformung der mechanisch beaufschlagten Probe haben. Um die Möglichkeiten unterschiedlicher Gelenkanordnungen auszuloten, besitzt die Probe einen Gestaltungsspielraum (DESIGN SPACE).

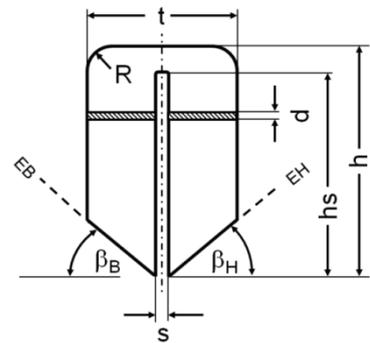
Die Simulation und Festigkeitsanalyse nach der FEM liefert die Gesamtverformung des belasteten Systems. In den Profilebenen sollen palmare Messpunkte auf der konvexen Innenseite am BUG (B), in der MITTE (M) und am HECK (H) analysiert werden. Gegenstand der Betrachtung der Gesamtverformung sind die Profilebenen WURZEL (W), MEDIAN (M) und TIP (T) am Tragflügel. Aus der Matrix der Messwerte sind nun unterschiedliche Verformungskenngrößen ableitbar.



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Probekörper für die Finite Elemente Analyse

Profiltiefe	t	100	[mm]		
Tragflächenlänge	h	120	[mm]	h/t	120 [%]
Fugenlänge	hs	100	[mm]	hs/t	100 [%]
Fugenbreite	S	2	[mm]	s/t	2 [%]
Profildicke	d	3	[mm]	d/t	3 [%]
Radius am Flügeltip	R	0,5	[mm]		
Gelenkwinkel (Bug)	β_{BUG}	45	[°]		
Gelenkwinkel (Heck)	β_{HECK}	45	[°]		



In dieser ersten Untersuchung interessieren wir uns für die Kurve einer Profelsehne CURVE die bei einem elastischen Ausweichverhalten CANT während der Beaufschlagung mit einer konstanten Flächenlast „erreicht“ werden kann. CANT und CURVE werden aus den erhobenen Messdaten in einfacher Weise ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Probekörper-Geometrien zu erreichen, werden die Messwerte CANT [%] und CURV[%] auf die generalisierte Tragflügeltiefe t bezogen ermittelt.

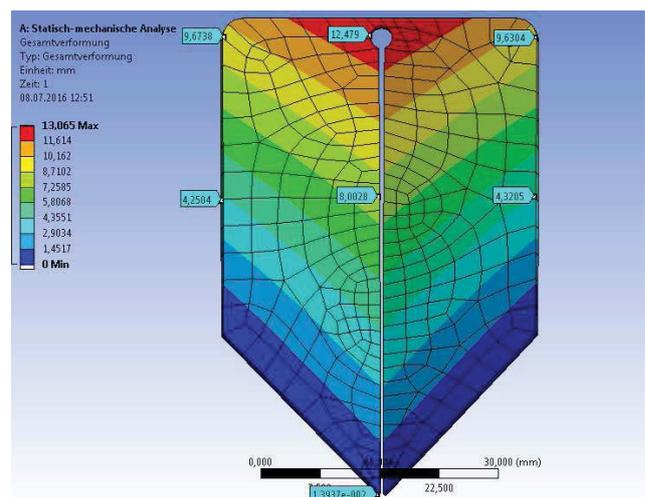
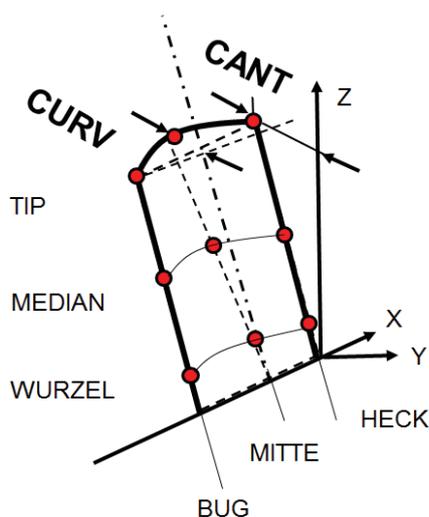


Abb.: Modus der Messdatenerhebung für die Auslenkung CANT und die Wölbung CURV aus einer FEM-Simulation. Messpunkte und Betrachtungsebenen (FEM-Simulation: ANSYS Release 16 Academic Research Version).

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Die Finite Elemente Analyse liefert eine umfangreiche Schar von Analysedaten. Ein Ergebnis der postprozessoralen Darstellung und Dokumentation ist ein umfassender Bericht, der nach jeder Simulation zu Verfügung steht und abgerufen werden kann. In der Simulationskampagne zur Untersuchung des Beaufschlagungs-Gestaltänderungs-gehens einer standardisierten Probe interessieren neben der Spannungsverteilung in der verformten Struktur in erster Linie die Verformungen des Tragflügelteils unter Last. Es können an beliebigen Stellen der deformierten Struktur Messdaten aufgenommen werden. Für einen ersten Erkenntnis-gewinn sind Messdaten am Flügelende, in der Medianebene und gegebenenfalls an der Flügelwurzel von Relevanz.

Der analysierte Probenkörper ist ein sehr einfaches Modell einer Tragfläche mit strukturelastischem Wölbplattengetriebe. Vereinfachend sei ein linear-elastisches Material und eine homogene Flächenlast angenommen. Der Probenkörper benutzt bewusst eine voll durchgesetzte Fuge als Modell, die in der gestalterischen Anwendungspraxis durch eine elastische, geschossene Fuge (U-, S- oder W-Fuge) ersetzt wird. Die V-förmig ausgeführte Lagerung an der Wurzel des Tragflügels stellt die konstruktive Minimalforderung des Gestaltungsprinzips aus der Phänomenologie der Mittelhandknochen der Wirbeltiere nach. Insofern stellt das aus den Graphiken ablesbare Beaufschlagungs-Verformungs-Gebaren der druckbelasteten Modelltragfläche ein mit Blick auf die Entwicklungsziele ermutigendes Simulationsergebnis dar. Nach dem (Getriebe-) Gestaltungs-paradigma für artifizielle Systeme aus der Phänomenologie der Mittelhandknochen kann eine Tragflügelfläche erst dann eine bevorzugte konkave „Wölbform CURV“ annehmen, wenn die Gestaltänderung mit der über die Lager vermittelten nach Lee gerichteten zwangskinematischen Strukturbewegung des Gesamtsystems „CANT erkaufte“ wird. Ein Gestaltungs- und Entwicklungsziel für struktur-kinematisch bewegliche Finnen wird zukünftig also sein, eine hinreichende große Wölbverformung CURV mit möglichst moderat investiertem CANT zu realisieren. In einem generalisierten Simulationsbeispiel wird die Krümmung CURV am Tragflügelrandbogen TIP mit $C_{TIP}=5\%$ Wölbung und in der Mittelebene MEDIAN mit $C_{MEDIAN}=7\%$ Wölbung errechnet. Ich möchte vereinfachend davon ausgehen, dass auch ein geschlossenes Fugenmodell vergleichbare Krümmungen CURV realisiert. Um zu überprüfen, ob die Wölbform der Tragflächenprobe auch fluidmechanisch taugt, betrachten wir erneut ein Diagramm der Querkraftkoeffizient über Anströmwinkel für ein Plattenprofil. Die Simulationsergebnisse aus der FEM-Analyse legen die Betrachtung von Profilen mit einer Wölbungsrücklage von $(x_f/t)=50\%$ nahe.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

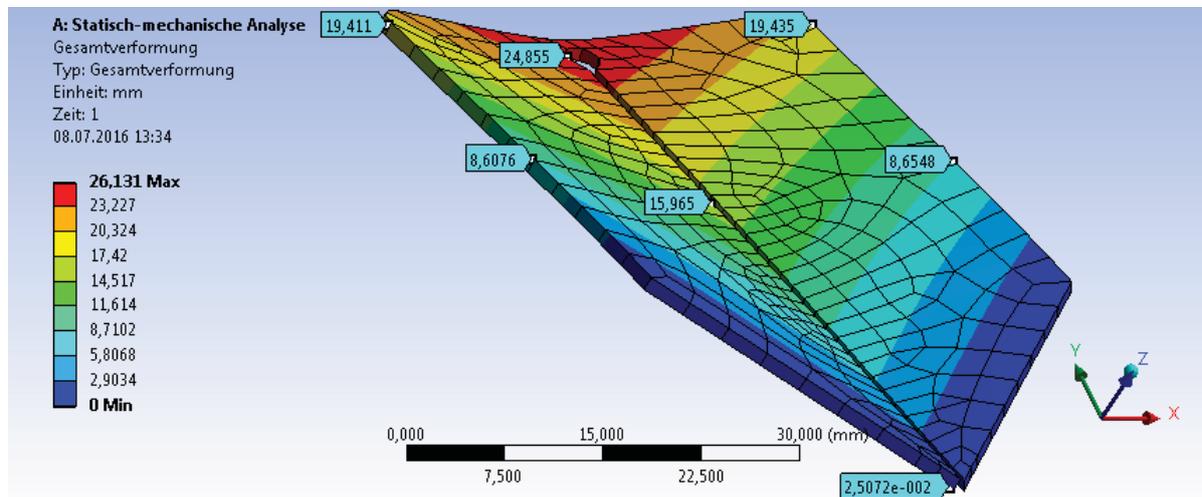


Abb.: Deformierte Modellkörperprobe. Und Berechnungsdaten in der Ebene MERIDIA und TIP. Gesamtverformung unter homogener Flächenbelastung analysiert mit der Finite Element Methode FEM (ANSYS Release 16 Academic Research Version). Mi. Dienst 2016.

In der Graphik sind die Berechnungsergebnisse für den Querkraftkoeffizienten der Grundkonfiguration des Profils PLATTE 06 00 00 sowie dessen Variationen hinsichtlich des Parameters Wölbung (f/t) bei konstanter Wölbungsrücklage ($x_f/t=50\%$) dargestellt. Physikalisch bedingt sind die c_A -Kurven der nunmehr nichtsymmetrischen Profilkonturen selbst asymmetrisch. Auffällig ist zunächst der absolute Wert des Lift-Koeffizienten einer gewölbten Platte mit einer Krümmung von 10% von $c_{a,STALL} > 2.0$. bei einem Stallwinkel mit $\alpha_{STALL} = 10[^\circ]$. Eine spezifische Wölbung $f/t = 5\%$ der Tragfläche genügt offenbar, um eine Erhöhung der Querkraftkoeffizienten von 50% gegenüber dem symmetrischen Profil zu bewirken. Die deformierten Geometrien der der Grundkonfiguration des Profils PLATTE 06 00 00 sind in der Graphik Abb.7 (links) dargestellt.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass das aus dem physiologischen Aufbau des Mittelhandknochensystems der Wirbeltiere extrahierten Gestaltungsprinzip funktionsart-bedingt unter Belastung eine Tragfläche ausbildet, deren Profilkontur eine konkave Wölbung aufweist. Die Tragfläche besitzt also ein nicht-orthodoxes Beaufschlagungs-Verformungs-Verhalten. Ursache ist die bauliche und funktionale Ausbildung eines „Gelenkplattengetriebes“. Das Gestaltungsprinzip ist die Grundlage für passive,

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

belastungsadaptive, autonom arbeitende, mechanische Anordnungen, die sich selbstständig, also ohne Steuerungs- und Regeleinriffe, unter Last zu einem konkaven System verformen.

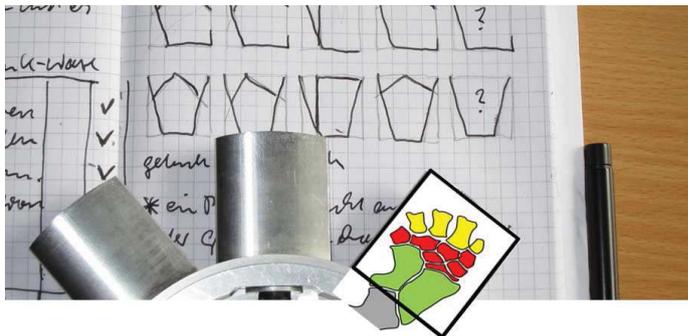
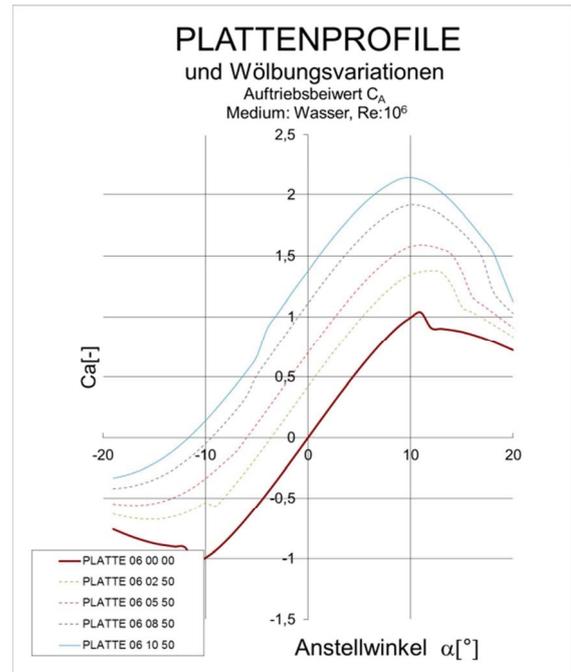
Platte P06 05 50 Re: 10E6, Wasser



Platte P06 08 50 Re: 10E6, Wasser



Abb.: Profilkonturen (links) und Querkraftkoeffizient über Anströmwinkel für ein Plattenprofil PLATTE[d/t][f/t][xf/t] mit einer Dicke (d/t) von 6% unter Variation der Wölbung (f/t) bei konstanter Wölbungsrücklage von (xf/t) = 50%



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Bibliographie

- [BHT-08] Thümer, R., Gorlitz, G.(Herausgeber) Forschungsassistenz IV der Technischen Fachhochschule Berlin 2008, ISBN 978-3-938576-11-3
- [Gare-11] Gareev, Andrei (2011). Analysis of variable pitch air turbines for oscillating water column (OWC) wave energy converters. University of Wollongon Thesis Collection
- [Gasch-05] Robert Gasch, Peter Bade, Jochen Twele: *Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf*. In: Robert Gasch (Hrsg.): *Lehrbuch Maschinenbau*. Nr. 4, Vieweg+Teubner Verlag, 2005, ISBN 9783519363347
- [Kreb - 08] Krebber, B.: "i-mech". Untersuchung der intelligenten Mechanik von Fischflossen mit Hilfe von FSI- Simulation. Forschungsbericht der Technischen Fachhochschule Berlin 2007/08
- [Kreb-08-1] B. Krebber, H.-D. Kleinschrodt und K. Hochkirch: (2008) Fluid-Struktur-Simulation zur Untersuchung intelligenter Mechanik von Fischflossen. ANSYS Conference & 26. CADFEM Users' Meeting, ISBN-3-937523-06-5
- [DEPAT-1] Belastungsadaptiv ausgebildete Bauteile (2009). Patent Nr. 10 2009 059 246.6, Anmeldung 23122009, Offenlegung. 22062011
- [Siew-10] Siewert, M; Kleinschrodt, H-D; Krebber, B; Dienst, Mi. (2010) FSI- Analyse autoadaptiver Profile für Strömungsleitflächen. In: Tagungsband, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting Aachen 2010.
- [Siew-11] Siewert, M; Kleinschrodt, H-D.(2011) Bionical Morphological Computation. In: Nachhaltige Forschung in Wachstumsbereichen Bd.1, S. 48-52. Logos Verlag Berlin.
- [Tria-95] Triantafyllou, M. (1995): Effizienter Flossenantrieb für Schwimmroboter, Spektrum der Wissenschaft 08-1995, S. 66–73, Wissenschaft- Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 1995.
- [Thor-99] Thorpe, T.W. (1999). A Brief Review of Wave Energy. The UK Department of Trade and Industry
- [WHIT-95] R. Curran, S. Raghunathan and T. Whittaker (1995). Asymmetrical and Fluctuating Performance of the Islay Wells Air Turbine, Queen's University Belfast, United Kingdom

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

- [www-01] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wells-Turbine>
[www-02] <http://de.wikipedia.org/wiki/Schnelllaufzahl>

PUBLIKATIONEN der Mitarbeiter der Bionic Research Unit Berlin (Auszug).

- [Barg-11] Bagaric, B. (2011). Modellierung, Simulation und Parametrisierung eines virtuellen Strömungskanals mit dem Programmsystem FS-Flow. Untersuchung typischer Szenarien endlicher Tragflügel. Bachelorarbeit a.d. BeuthHS Berlin (082011).
- [Mir-05] Mirtsch, F., Dienst, Mi. (2005) Artifizielle adaptive Strömungskörper nach dem Vorbild der Natur. Forschungsbericht 30042005. Kinematiken und Gestaltungs-prinzip. Forschungsberichte der Technischen Fachhochschule Berlin.
- [Kreb-08] Krebber, B. (2008) "i-mech". Untersuchung der intelligenten Mechanik von Fischflossen mit Hilfe von FSI- Simulation. Forschungsbericht der Technischen Fachhochschule Berlin 2007/08
- [Kreb-08-1] Krebber, B., Kleinschrodt, H.-D. und Hochkirch, K.: (2008) Fluid-Struktur-Simulation zur Untersuchung intelligenter Mechanik von Fischflossen. ANSYS Conference & 26. CADFEM Users' Meeting, ISBN-3-937523-06-5
- [Siew-11] Siewert, M; Kleinschrodt, H.-D.(2011) Bionical Morphological Computation. In: Nachhaltige Forschung in Wachstumsbereichen Bd.1, Logos Verlag Berlin.
- [Siew-10] Siewert, M; Kleinschrodt, H.-D.; Krebber, B; Dienst, Mi. (2010) FSI-Analyse auto-adaptiver Profile für Strömungsleitflächen. In: Tagungsband, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting Aachen 2010.
- [Voss-13] Voß, M., H.-D. Kleinschrodt, H.-D., (2013) 3D-Fluid-Struktur-Interaktion symmetrischer Profile mit Innenstrukturierung. ANSYS Conference & 31. CADFEM Users' Meeting, Juni 2013, Rosengarten Mannheim.
- [Voss-12-2] Voß, M., H.-D. Kleinschrodt, H.-D., (2012) Fluid-Struktur-Interaktion flexibler Tragflügelprofile nach dem Vorbild der belebten Natur. ANSYS Conference & 30. CADFEM Users' Meeting, Oktober 2012, Kongress Palais Kassel, 32 S., ISBN 3-937523-09-X
- [Voss-12-1] Voß, M., H.-D. Kleinschrodt, H.-D., (2012) Zwei-Wege-Fluid-Struktur-Interaktion mit OpenFOAM, Tagungsband. Jahrestreffen

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

- der Fachgruppen Computational Fluid Dynamics und Fluidverfahrenstechnik. März 2012, Weimar.
- [Ost-13] Ost, S., Kleinschrodt, H.-D., (2013) Adaptiv Foils, in: Nachhaltige Forschung in Wachstumsbereichen, Bd.4, Mensch und Buch Verlag, Berlin ISBN 978-3-86387-392-9
- [Vos-15-1] M. Voss, P.U. Thamsen, H.-D. Kleinschrodt, M. Dienst (2015): "Experimental and numerical investigation on fluid-structure-interaction of auto-adaptive flexible foils", Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), Budapest, Ungarn, 1.-4. September 2015, ISBN (Buch): 978-963-313-190-9.
- [Vos-15-2] M. Voß, H.-D. Kleinschrodt, M. Dienst: "Experimentelle und numerische Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion flexibler Tragflügelprofile", Research Day 2015 - Stadt der Zukunft Tagungsband - 21.04.2015, Mensch und Buch Verlag Berlin, S. 180-184, Hrsg.: M. Gross, S. von Klinski, Beuth Hochschule für Technik Berlin, September 2015, ISBN:978-3-86387-595-4

BIBLIOGRAPHIE Bionik und Entwicklungsmethoden

- [1] Rechenberg, I. (1994)Evolutionstrategie'94. Frommann-Holzboog Verlag. Stuttgart.
- [2] Barthlott, W.; Neinhuis, C.: Lotusblumen und Autolacke – Ultrastruktur pflanzlicher Grenzflächen und biomimetische unverschmutzbare Werkstoffe. (1998) Biona Report 12, Schriftenreihe der Wissenschaften und der Literatur, Mainz. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- [3] Bannasch, R. (2002): Vorbild Natur. In: design report 9/02, Blue.C. Verlag Stuttgart.
- [4] Bappert, R. (1999) Bionik, Zukunftstechnik lernt von der Natur. SiemensForum München/Berlin und Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim (Herausgeber)
- [5] Bechert, D W. (1993):Verminderung des Strömungswiderstandes durch bionische Oberflächen. In: VDI, Technologieanalyse Bionik, S. 74 – 77. VDI-Technologiezentrum Düsseldorf.
- [6] Bechert, D W., (1997): Biological Surfaces and their Technological Application. 28th AIAA Fluid Dynamics Conference.
- [7] Nachtigall, W.(1998): Bionik – Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

- [8] Nachtigall, W., Blüchel, K. (2000): Das große Buch der Bionik. Stuttgart: Dt. Verlagsanstalt.
- [9] Triantafyllou, M. (1995): Effizienter Flossenantrieb für Schwimmroboter. In: Spektrum der Wissenschaft, 08-1995, S. 66 –73. Spektrum der Wissenschaft- Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg
- [10] Liao, J.C., Beal, D., Lauder, G., Triantayllou, Fish, M. (2003): Exploting Vortices Decrease Muscle Activty. In: Science 2003, S. 1566-1569. AAAS.
- [11] VDI-Richtlinie 6220. Bionik – Konzeption und Strategie Düsseldorf. VDI-Verlag 2012.
- [12] Turing, A. (1952): The Chemical Basis of Morphogenesis. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series B. 237, Nr. 641
- [13] Gierer, A., Meinhard, H. (1972): A Theorie of biological Pattern Formation. Kybernetic 12.
- [14] Meinhard, H. (2001): Aufbau von Mustern in der Biologie. In: Biologie in unserer Zeit 31, 01.
- [15] Meinhard, H. (1982): Models of biological pattern formation. Academic Press, London.
- [16] Dienst, M. (2005): Genesettransformation. Ein Algorithmus zur Synthese von Signalen nach dem Vorbild der biologischen Musterbildung. In: Forschungsberichte 2005 der Technischen Fachhochschule Berlin, S. 190–193.
- [17] Dienst, M. (2006): Eine Optimierungsumgebung für Genesettransformationen. In: Forschungsberichte 2006 der Technischen Fachhochschule Berlin. S. 115-117.
- [18] Dienst, M.(2011): Methoden in der Bionik. Froude-Zahl und Rumpfgeschwindigkeit eines Wasservogels. GRIN-Verlag GmbH München, ISBN (Buch): 978-3-640-92529-2
- [19] Nachtigall, W. (2001): Biomechanik: Grundlagen Beispiele Übungen Vieweg/Teubner Verlag; Auflage: 2., ISBN-10: 3528139269
- [20] Nachtigall, W., (2005): Biologisches Design: Systematischer Katalog für bionisches Gestalten Springer; ISBN-13: 978-3540227892
- [21] Richard, H.A., Kullmer, G., (2013): Biomechanik: Grundlagen und Anwendungen auf den menschlichen Bewegungsapparat, Springer Vieweg; ISBN-13: 978-3834803849
- [22] Bonin, D., Wischniewski, S., Wirsching, H., Upmann, A., Rausch, Paul, G. (2014): "Exchanging data between Digital Human Modelling systems: a review of data formats", 3rd International Digital Human Modeling Symposium, Tokyo, Japan.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

- [23] Paul, G. & Lee, W. (2011): "Interfacing Jack And Anybody: Towards Anthropometric Musculoskeletal Digital Human Modeling", , pp. 8 pp., 1st International Symposium on Digital Human Modelling, 14-16 June 2011, Université Claude Bernard, Lyon
- [24] Rasmussen, J. (2007): "AnyBody: CAE for the human body", ANSYS Conference & 25th.CADFEM Users' Meeting, CADFEM GmbH.
- [25] Damsgaard, M., Rasmussen, J., Tørholm Christensen, S., Surma, de Zee, M. (2006): "Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 14, pp. 1100-1111.
- [26] Dössel, O., (1999): Bildgebende Verfahren in der Medizin: Von der Technik zur medizinischen Anwendung. Springer Verlag. München.
- [27] Badler, N.I., Barsky, B.A., Zeltzer, D. (1990): Making Them Move: Mechanics, Control & Animation of Articulated Figures. In: The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Focal Press; 1 edition, ISBN-13: 978-1558601062
- [28] Mirtich, B. V.(1996): Impulse-based dynamic simulation of rigid body systems, University of California at Berkely, Diss.
- [29] Weinstein, R. L.(2007): Simulation and Control of Articulated Rigid Bodies, Stanford University, Departement of Computer Science, Diss.
- [30] Pahl. G.; Beitz, W.(1993): Konstruktionslehre, 3.Auflage. Berlin-Heidelberg- New York London-Paris Tokio: Springer.
- [31] French, M. (1999): Conceptual Design for Engineers. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio: Springer.
- [32] Dienst, M. (2013): About nonorthodox behavior of fish fins. Intelligent Mechanics in Nature and Design, GRIN-Verlag GmbH München, ISBN: 978-3-656-44320-9.
- [33] Mirtsch, F., Dienst, M. (2005): Artificielle adaptive Strömungskörper nach dem Vorbild der Natur. Kinematiken und Gestaltungsprinzip. Forschungsberichte 2005 der TFH Berlin.
- [34] Krebber, B. (2008): "i-mech". Untersuchung der intelligenten Mechanik von Fischflossen mit Hilfe von FSI- Simulation. Forschungsbericht der TFH Berlin 07/08
- [35] Krebber, B., Kleinschrodt, H.-D. und Hochkirch, K.: (2008): Fluid-Struktur-Simulation zur Untersuchung intelligenter Mechanik von Fischflossen. ANSYS Conference & 26. CADFEM Users' Meeting, ISBN-3-937523-06-5

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

- [37] Robert Gasch, Jochen Twele (Hrsg.): Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 8. aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013, ISBN 978-3-8348-2562-9.
- [38] Patent US1835018: Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current. Angemeldet am 8. Dezember 1931, veröffentlicht am 1. Oktober 1928, Anmelder: Darrieus Georges Jean Marie, Erfinder: Darrieus Georges Jean Marie.

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

ANHANG

Reihenuntersuchung an Repellerprofilen

Symmetrische Profile

(1) NACA 0020

(2) ERpLK 00 30 20

Asymmetrische Profile

(3) NACA 5 3 20

(4) ERpLK 05 30 20

Synthetische Profile (CARPO)

(5) ERpLK 00 50 20

(6) ERpLK 05 50 20

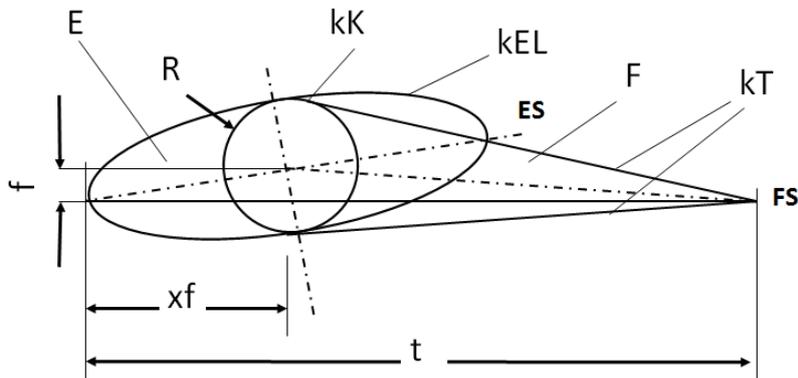
Reales, modelliertes und synthetisches Tragflügelprofil einer Turbinenschaufel

Profilspezifikation für ein gekröpftes ERpL-Profil (**EllipticRigide per Length**) **ERpL-K [f/t][xf/t][d/t]**

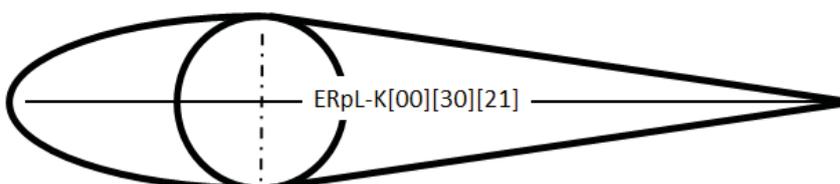
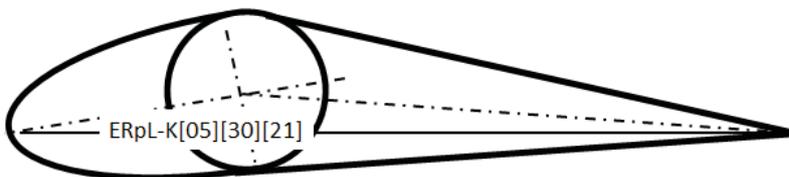
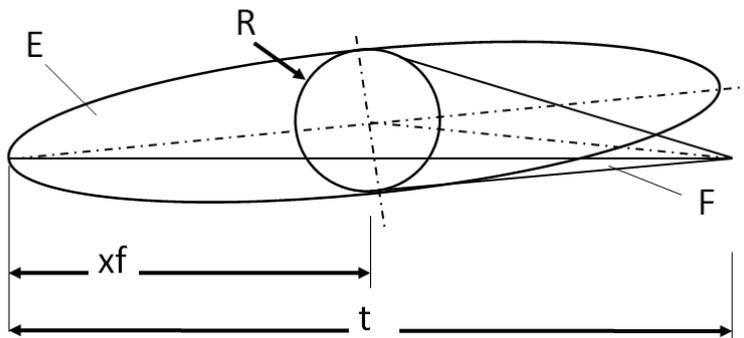
E	elliptischer Körper (Bug)
F	Finne (Heck)
t	Profiltiefe
d = R/2	Profildicke
f	Profilkrümmung(aus Kröpfung)
xf	Dickenrücklage
d/t	Profildicke (spezifisch)
f/t	Profilkrümmung (spezifisch aus Kröpfung)
xf/t	Dickenrücklage (spezifisch)
kK	Konstruktionskreis
kEL	Konstruktionsellipse
kT	Konstruktionstangente
βK	Kröpfungswinkel (der Profilseelen)
ES	Ellipsenseele
FS	Finnenseele

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Das gekröpfte ERpL-Profil [f/t][xf/t][d/t]
ERpL-K [05][30][21]

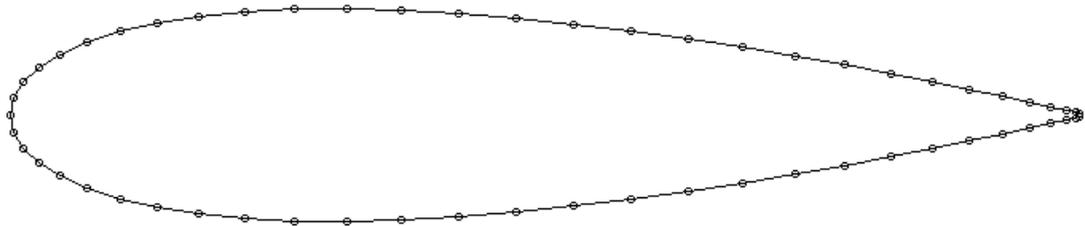


ERpL-K [05][50][20]

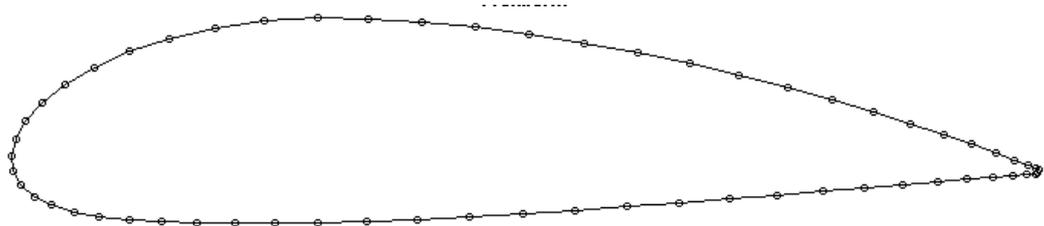


Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme

NACA 00 20

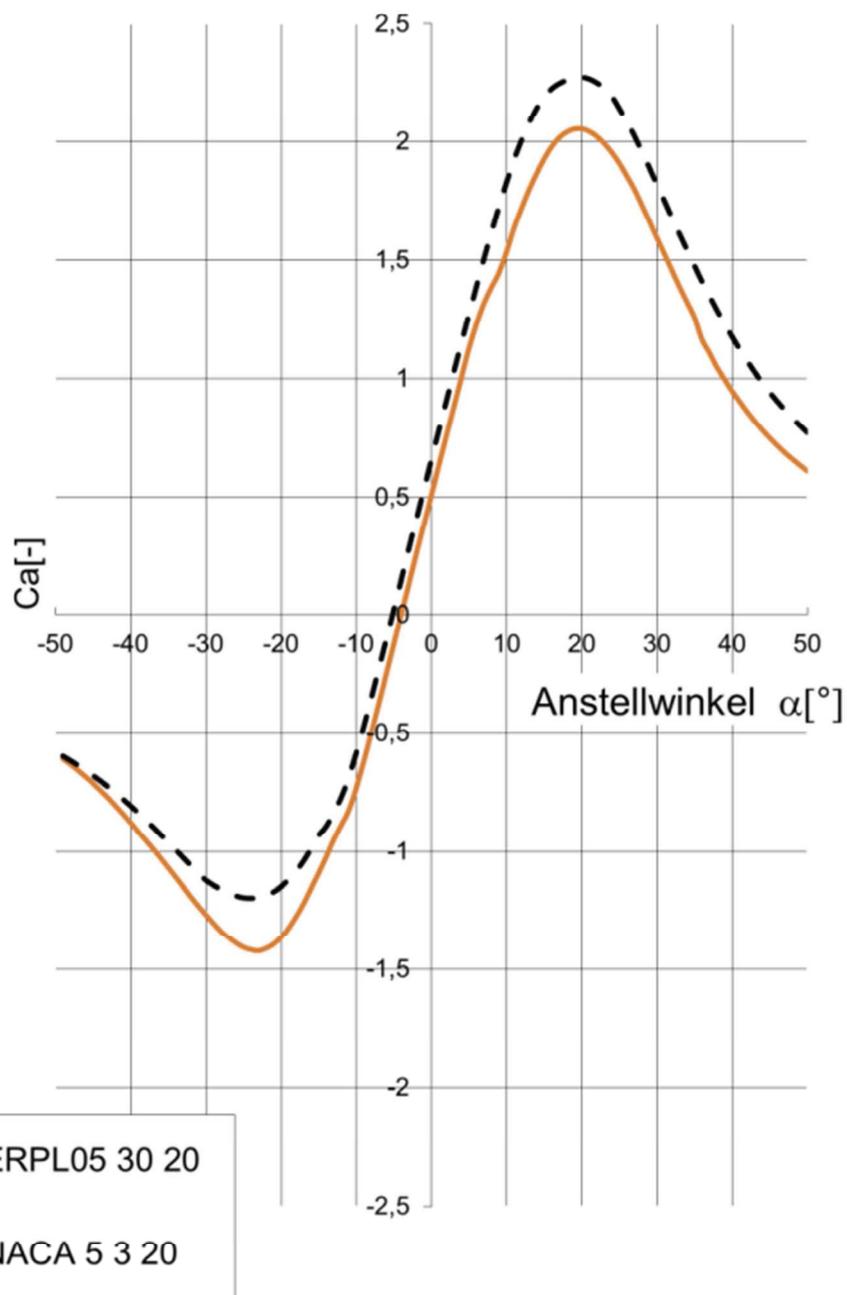


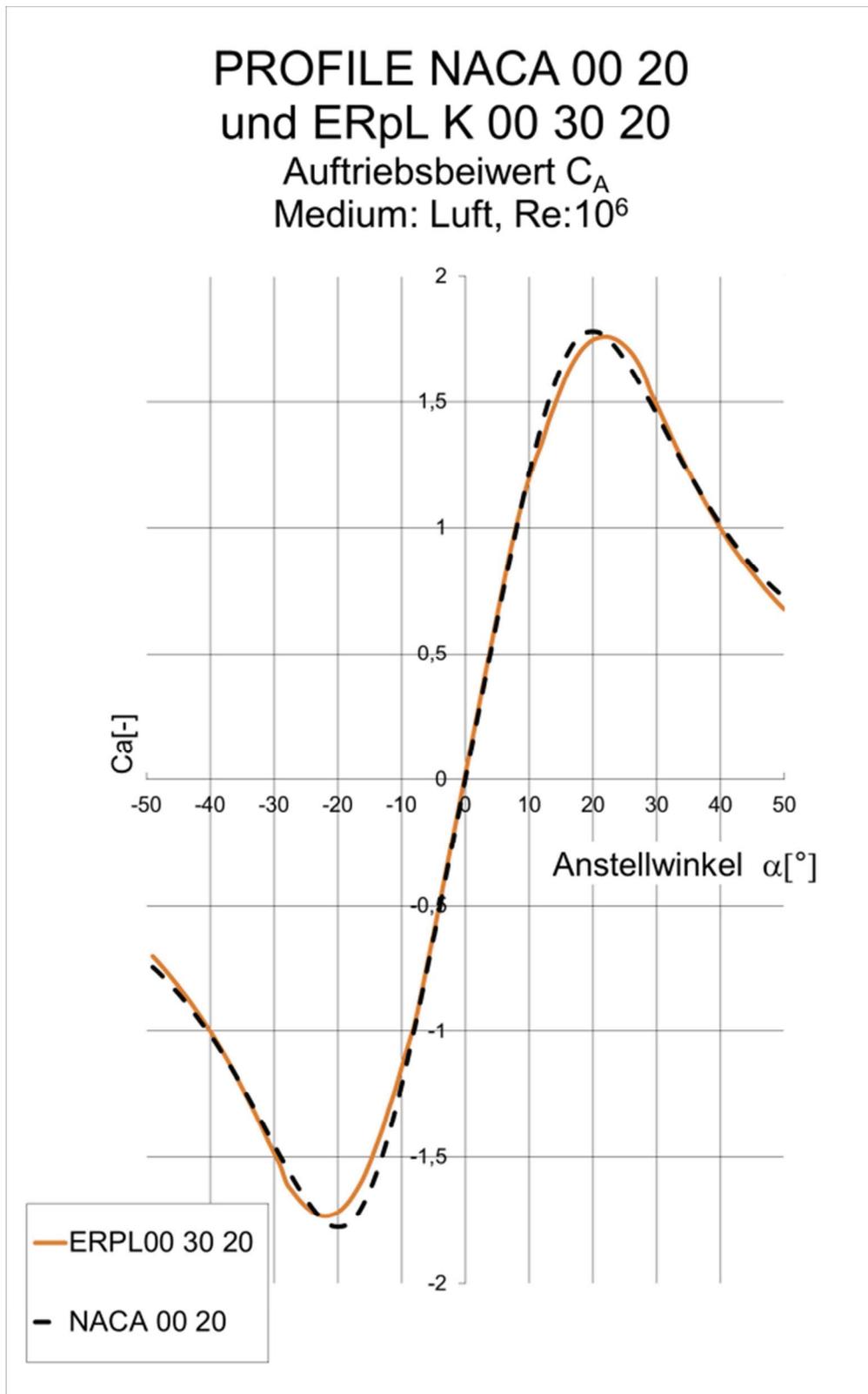
NACA 5 3 20



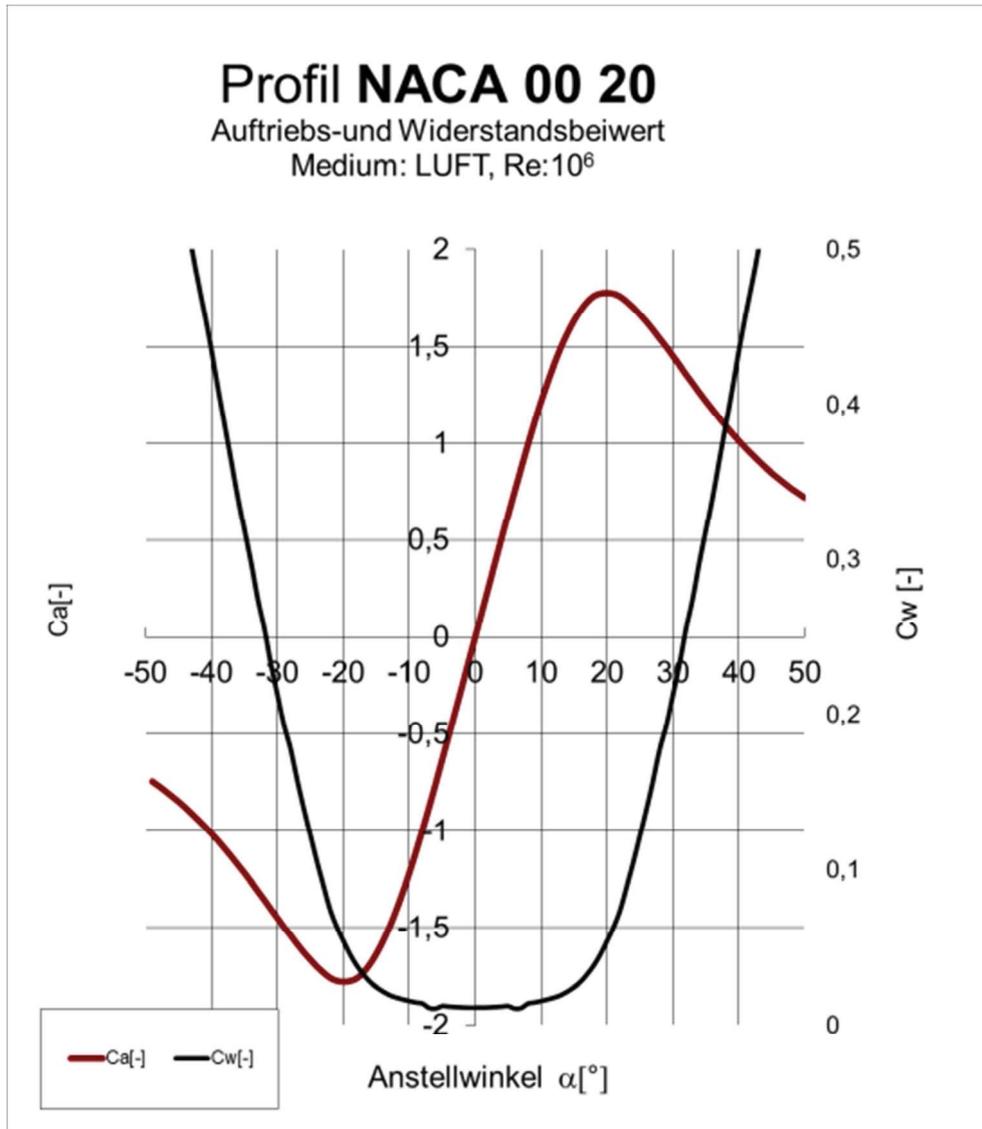
PROFILE NACA 5 3 20 und ERpL K 05 30 20

Auftriebsbeiwert C_A
Medium: Luft, $Re:10^6$

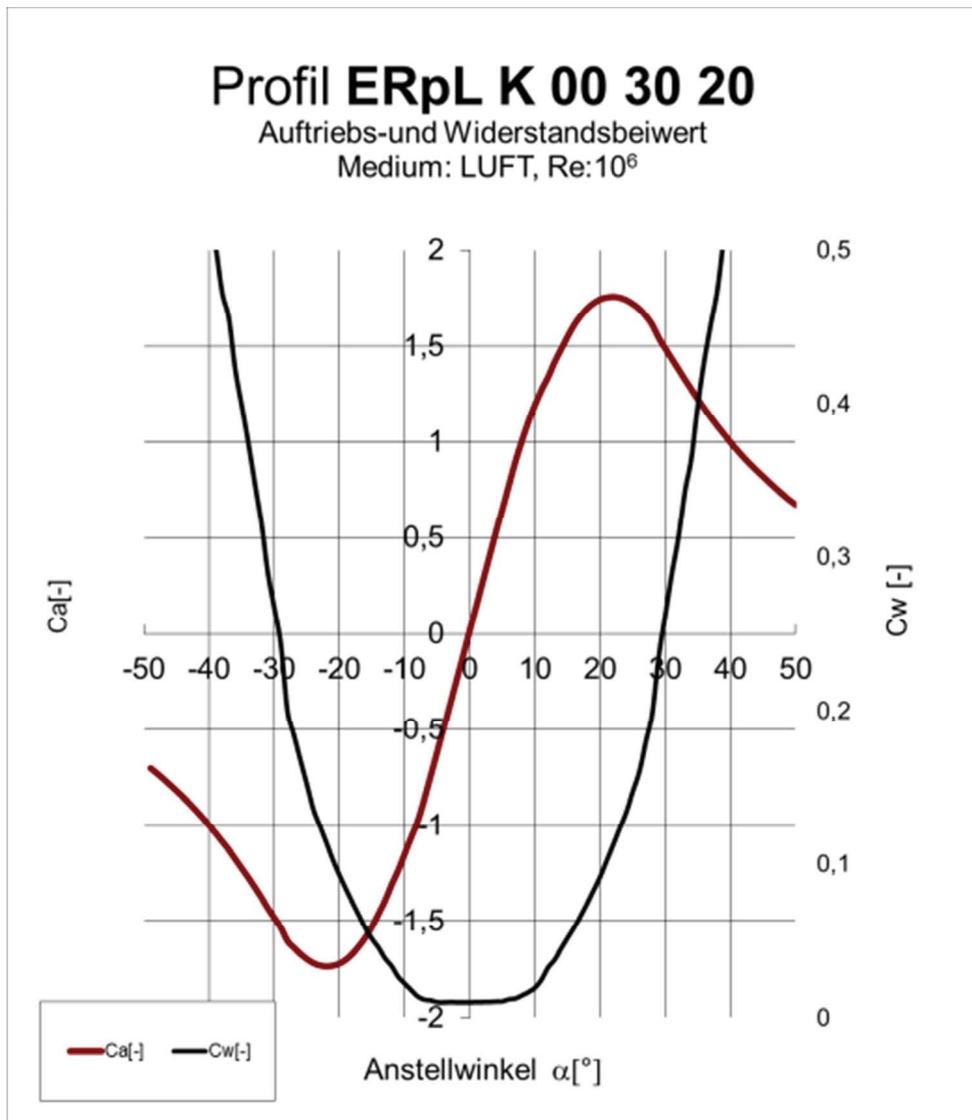




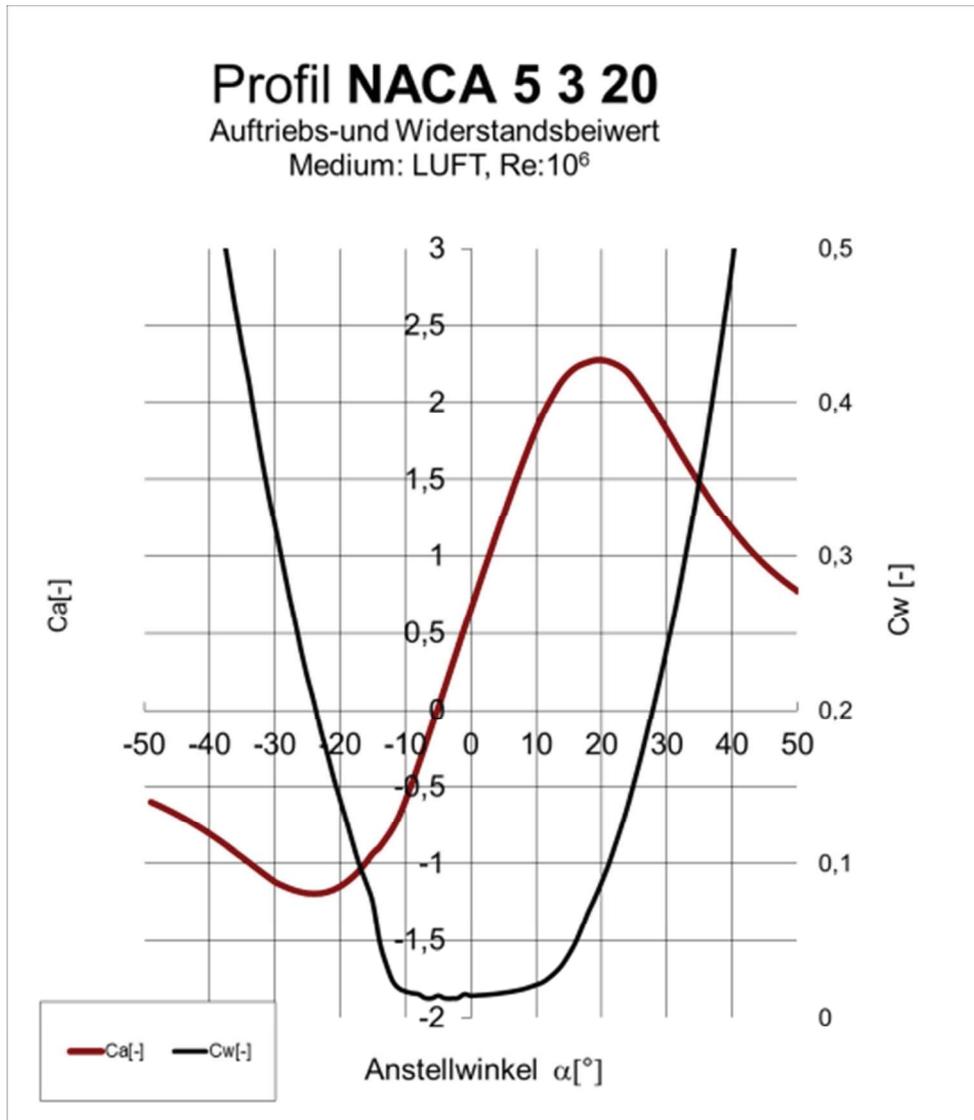
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme



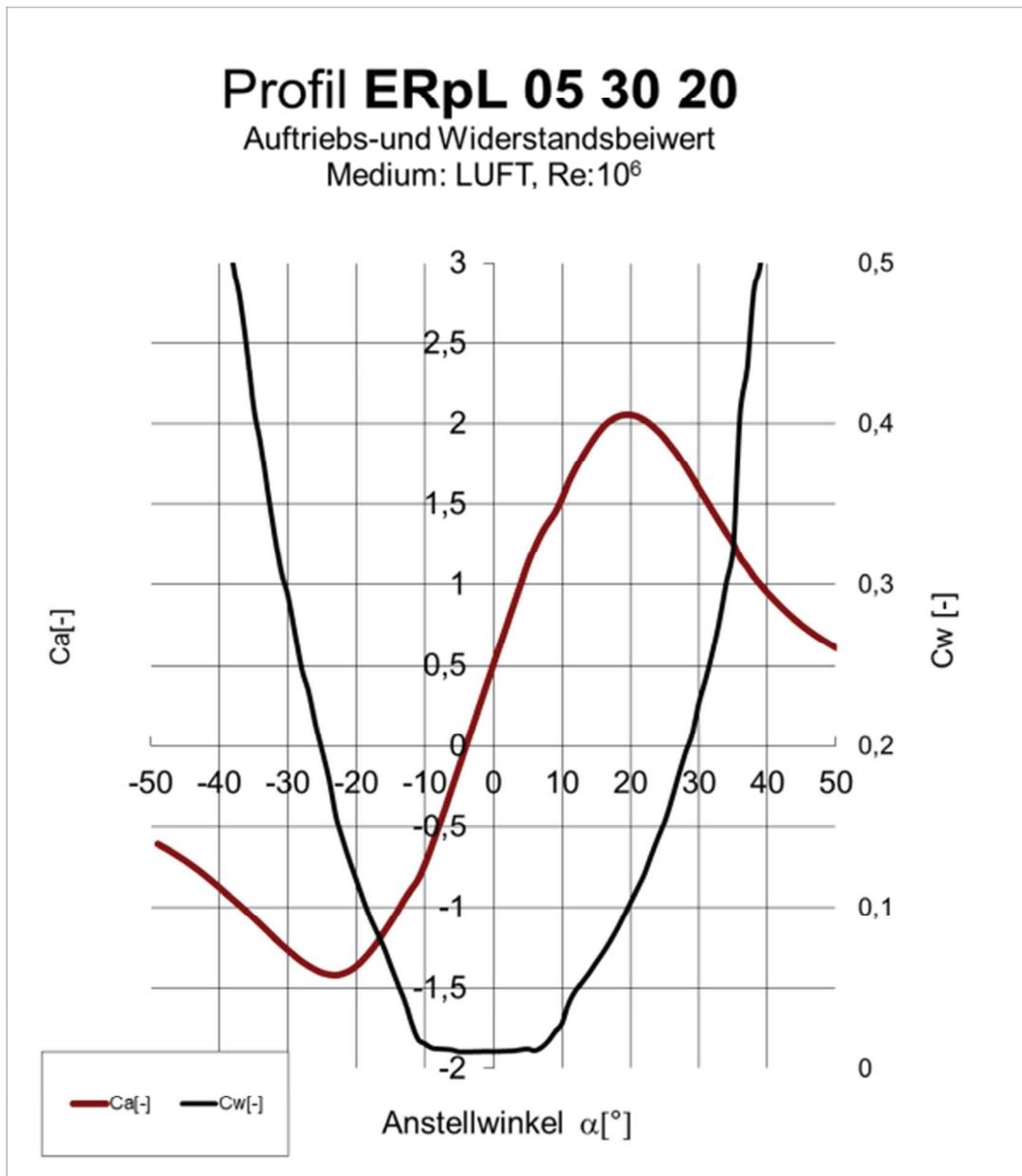
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme



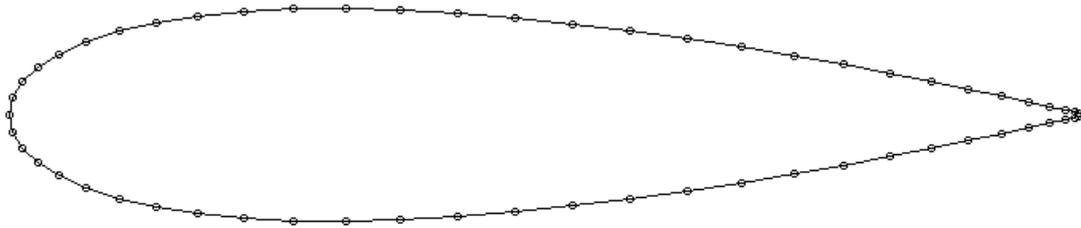
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für
Rotationssysteme



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Reihenuntersuchung, Luft, Re 10E6

Symmetrische Profile NACA 0020



1,0000	0,0021
0,9971	0,0028
0,9883	0,0048
0,9738	0,0081
0,9538	0,0126
0,9284	0,0181
0,8980	0,0245
0,8630	0,0316
0,8237	0,0393
0,7806	0,0473
0,7342	0,0554
0,6851	0,0635
0,6338	0,0713
0,5809	0,0786
0,5271	0,0853
0,4729	0,0909
0,4191	0,0954
0,3662	0,0985
0,3149	0,0999
0,2658	0,0996
0,2194	0,0973
0,1763	0,0930
0,1370	0,0867
0,1020	0,0786
0,0716	0,0687
0,0462	0,0573
0,0262	0,0445
0,0117	0,0306
0,0029	0,0157
0,0000	0,0000
0,0029	-0,0157
0,0117	-0,0306
0,0262	-0,0445
0,0462	-0,0573
0,0716	-0,0687

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,1020 -0,0786
 0,1370 -0,0867
 0,1763 -0,0930
 0,2194 -0,0973
 0,2658 -0,0996
 0,3149 -0,0999
 0,3662 -0,0985
 0,4191 -0,0954
 0,4729 -0,0909
 0,5271 -0,0853
 0,5809 -0,0786
 0,6338 -0,0713
 0,6851 -0,0635
 0,7342 -0,0554
 0,7806 -0,0473
 0,8237 -0,0393
 0,8630 -0,0316
 0,8980 -0,0245
 0,9284 -0,0181
 0,9538 -0,0126
 0,9738 -0,0081
 0,9883 -0,0048
 0,9971 -0,0028
 1,0000 -0,0021

x/L	y/L	v/V
1,00000	0,00210	0,65038
0,99710	0,00280	0,85365
0,98830	0,00480	0,81797
0,97380	0,00810	0,86205
0,95380	0,01260	0,90323
0,92840	0,01810	0,93510
0,89800	0,02450	0,96569
0,86300	0,03160	0,99242
0,82370	0,03930	1,02025
0,78060	0,04730	1,04479
0,73420	0,05540	1,06659
0,68510	0,06350	1,09124
0,63380	0,07130	1,11401
0,58090	0,07860	1,13543
0,52710	0,08530	1,16323
0,47290	0,09090	1,18347
0,41910	0,09540	1,20858
0,36620	0,09850	1,23357
0,31490	0,09990	1,25308
0,26580	0,09960	1,27615
0,21940	0,09730	1,29127
0,17630	0,09300	1,30143

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,13700	0,08670	1,30081
0,10200	0,07860	1,29352
0,07160	0,06870	1,26310
0,04620	0,05730	1,20961
0,02620	0,04450	1,09363
0,01170	0,03060	0,88485
0,00290	0,01570	0,51534
0,00000	0,00000	0,00000
0,00290	-0,01570	0,51534
0,01170	-0,03060	0,88485
0,02620	-0,04450	1,09363
0,04620	-0,05730	1,20961
0,07160	-0,06870	1,26310
0,10200	-0,07860	1,29352
0,13700	-0,08670	1,30081
0,17630	-0,09300	1,30143
0,21940	-0,09730	1,29127
0,26580	-0,09960	1,27615
0,31490	-0,09990	1,25308
0,36620	-0,09850	1,23357
0,41910	-0,09540	1,20858
0,47290	-0,09090	1,18347
0,52710	-0,08530	1,16323
0,58090	-0,07860	1,13543
0,63380	-0,07130	1,11401
0,68510	-0,06350	1,09124
0,73420	-0,05540	1,06659
0,78060	-0,04730	1,04479
0,82370	-0,03930	1,02025
0,86300	-0,03160	0,99242
0,89800	-0,02450	0,96569
0,92840	-0,01810	0,93510
0,95380	-0,01260	0,90323
0,97380	-0,00810	0,86205
0,98830	-0,00480	0,81797
0,99710	-0,00280	0,85365
1,00000	-0,00210	0,65038

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	Cp* [-]	M krit.
-20,0	-1,583	0,19304	0,030	-10,488	0,243
-18,0	-1,554	0,15255	0,030	-8,703	0,266
-16,0	-1,495	0,11251	0,030	-7,226	0,289
-14,0	-1,409	0,07852	0,029	-5,913	0,315
-12,0	-1,301	0,05231	0,027	-4,699	0,348
-10,0	-1,152	0,03732	0,024	-3,590	0,389
-8,0	-0,962	0,02902	0,020	-2,703	0,435
-6,0	-0,741	0,02450	0,016	-1,979	0,488
-4,0	-0,502	0,02052	0,011	-1,420	0,545
-2,0	-0,253	0,02072	0,005	-1,003	0,606
-0,0	0,000	0,02029	-0,000	-0,694	0,666
2,0	0,253	0,02072	-0,005	-1,003	0,606
4,0	0,502	0,02052	-0,011	-1,420	0,545
6,0	0,741	0,02450	-0,016	-1,979	0,488
8,0	0,962	0,02902	-0,020	-2,703	0,435
10,0	1,152	0,03732	-0,024	-3,590	0,389
12,0	1,301	0,05231	-0,027	-4,699	0,348
14,0	1,409	0,07852	-0,029	-5,913	0,315
16,0	1,495	0,11251	-0,030	-7,226	0,289
18,0	1,554	0,15255	-0,030	-8,631	0,267
20,0	1,583	0,19304	-0,030	-10,121	0,248

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

x/l	y/l	v/V	δ_1	δ_2	δ_3	Re δ_2	C _f	H ₁₂	H ₃₂	Zust.	y1
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
1,0000	0,0021	0,6504	0,019856	0,007657	0,010340	498,0	0,0000	2,5933	1,3504	abgel.	0,0000
0,9971	0,0028	0,8537	0,019856	0,007657	0,010340	653,6	0,0000	2,5933	1,3504	abgel.	0,0000
0,9883	0,0048	0,8180	0,019856	0,007657	0,010340	626,3	0,0000	2,5933	1,3504	abgel.	0,0000
0,9738	0,0081	0,8621	0,019856	0,007657	0,010340	660,1	0,0000	2,5933	1,3504	turb.	0,0000
0,9538	0,0126	0,9032	0,009639	0,005085	0,008062	475,2	0,0021	1,8955	1,5854	turb.	0,0312
0,9284	0,0181	0,9351	0,007875	0,004462	0,007209	430,6	0,0026	1,7650	1,6159	turb.	0,0279
0,8980	0,0245	0,9657	0,006749	0,003982	0,006509	395,1	0,0029	1,6946	1,6345	turb.	0,0261
0,8630	0,0316	0,9924	0,005812	0,003539	0,005838	361,0	0,0033	1,6423	1,6496	turb.	0,0248
0,8237	0,0393	1,0202	0,005134	0,003176	0,005263	331,7	0,0035	1,6166	1,6574	turb.	0,0240
0,7806	0,0473	1,0448	0,004619	0,002867	0,004758	305,7	0,0036	1,6108	1,6592	turb.	0,0237
0,7342	0,0554	1,0666	0,004107	0,002554	0,004239	278,6	0,0037	1,6083	1,6600	turb.	0,0234
0,6851	0,0635	1,0912	0,003703	0,002276	0,003764	253,5	0,0036	1,6273	1,6542	turb.	0,0235
0,6338	0,0713	1,1140	0,003403	0,002031	0,003332	230,7	0,0034	1,6753	1,6401	turb.	0,0241
0,5809	0,0786	1,1354	0,003091	0,001774	0,002877	206,3	0,0032	1,7424	1,6220	turb.	0,0251
0,5271	0,0853	1,1632	0,003059	0,001586	0,002505	187,7	0,0024	1,9284	1,5791	turb.	0,0287
0,4729	0,0909	1,1835	0,003209	0,001403	0,002130	169,6	0,0015	2,2877	1,5182	turb.	0,0369
0,4191	0,0954	1,2086	0,003833	0,001237	0,001897	152,5	0,0014	3,0997	1,5342	lam.	0,0384
0,3662	0,0985	1,2336	0,003313	0,001104	0,001699	138,3	0,0018	3,0011	1,5394	lam.	0,0338
0,3149	0,0999	1,2531	0,002663	0,000959	0,001492	122,4	0,0028	2,7768	1,5554	lam.	0,0268
0,2658	0,0996	1,2761	0,002235	0,000834	0,001305	107,7	0,0036	2,6796	1,5640	lam.	0,0235
0,2194	0,0973	1,2913	0,001856	0,000719	0,001131	93,5	0,0048	2,5816	1,5737	lam.	0,0205
0,1763	0,0930	1,3014	0,001565	0,000615	0,000970	80,0	0,0059	2,5449	1,5780	lam.	0,0184
0,1370	0,0867	1,3008	0,001259	0,000511	0,000811	66,1	0,0080	2,4645	1,5878	lam.	0,0158
0,1020	0,0786	1,2935	0,001020	0,000421	0,000670	53,1	0,0105	2,4242	1,5931	lam.	0,0138
0,0716	0,0687	1,2631	0,000779	0,000332	0,000533	40,3	0,0154	2,3427	1,6042	lam.	0,0114
0,0462	0,0573	1,2096	0,000589	0,000257	0,000415	28,1	0,0237	2,2880	1,6121	lam.	0,0092
0,0262	0,0445	1,0936	0,000440	0,000196	0,000318	17,6	0,0404	2,2413	1,6192	lam.	0,0070
0,0117	0,0306	0,8848	0,000361	0,000161	0,000262	8,3	0,0856	2,2352	1,6202	lam.	0,0048
0,0029	0,0157	0,5153	0,000361	0,000161	0,000262	0,3	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
0,0000	0,0000	0,0000	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0029	-0,0157	0,5153	0,000361	0,000161	0,000262	0,3	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
0,0117	-0,0306	0,8848	0,000361	0,000161	0,000262	8,3	0,0856	2,2352	1,6202	lam.	0,0048
0,0262	-0,0445	1,0936	0,000440	0,000196	0,000318	17,6	0,0404	2,2413	1,6192	lam.	0,0070
0,0462	-0,0573	1,2096	0,000589	0,000257	0,000415	28,1	0,0237	2,2880	1,6121	lam.	0,0092
0,0716	-0,0687	1,2631	0,000779	0,000332	0,000533	40,3	0,0154	2,3427	1,6042	lam.	0,0114
0,1020	-0,0786	1,2935	0,001020	0,000421	0,000670	53,1	0,0105	2,4242	1,5931	lam.	0,0138
0,1370	-0,0867	1,3008	0,001259	0,000511	0,000811	66,1	0,0080	2,4645	1,5878	lam.	0,0158
0,1763	-0,0930	1,3014	0,001565	0,000615	0,000970	80,0	0,0059	2,5449	1,5780	lam.	0,0184
0,2194	-0,0973	1,2913	0,001856	0,000719	0,001131	93,5	0,0048	2,5816	1,5737	lam.	0,0205
0,2658	-0,0996	1,2761	0,002235	0,000834	0,001305	107,7	0,0036	2,6796	1,5640	lam.	0,0235
0,3149	-0,0999	1,2531	0,002663	0,000959	0,001492	122,4	0,0028	2,7768	1,5554	lam.	0,0268
0,3662	-0,0985	1,2336	0,003313	0,001104	0,001699	138,3	0,0018	3,0011	1,5394	lam.	0,0338
0,4191	-0,0954	1,2086	0,003833	0,001237	0,001897	152,5	0,0014	3,0997	1,5342	lam.	0,0384
0,4729	-0,0909	1,1835	0,003209	0,001403	0,002130	169,6	0,0015	2,2877	1,5182	turb.	0,0369
0,5271	-0,0853	1,1632	0,003059	0,001586	0,002505	187,7	0,0024	1,9284	1,5791	turb.	0,0287
0,5809	-0,0786	1,1354	0,003091	0,001774	0,002877	206,3	0,0032	1,7424	1,6220	turb.	0,0251
0,6338	-0,0713	1,1140	0,003403	0,002031	0,003332	230,7	0,0034	1,6753	1,6401	turb.	0,0241
0,6851	-0,0635	1,0912	0,003703	0,002276	0,003764	253,5	0,0036	1,6273	1,6542	turb.	0,0235
0,7342	-0,0554	1,0666	0,004107	0,002554	0,004239	278,6	0,0037	1,6083	1,6600	turb.	0,0234
0,7806	-0,0473	1,0448	0,004619	0,002867	0,004758	305,7	0,0036	1,6108	1,6592	turb.	0,0237
0,8237	-0,0393	1,0202	0,005134	0,003176	0,005263	331,7	0,0035	1,6166	1,6574	turb.	0,0240
0,8630	-0,0316	0,9924	0,005812	0,003539	0,005838	361,0	0,0033	1,6423	1,6496	turb.	0,0248
0,8980	-0,0245	0,9657	0,006749	0,003982	0,006509	395,1	0,0029	1,6946	1,6345	turb.	0,0261
0,9284	-0,0181	0,9351	0,007875	0,004462	0,007209	430,6	0,0026	1,7650	1,6159	turb.	0,0279
0,9538	-0,0126	0,9032	0,009639	0,005085	0,008062	475,2	0,0021	1,8955	1,5854	turb.	0,0312
0,9738	-0,0081	0,8621	0,019856	0,007657	0,010340	660,1	0,0000	2,5933	1,3504	turb.	0,0000
0,9883	-0,0048	0,8180	0,019856	0,007657	0,010340	626,3	0,0000	2,5933	1,3504	abgel.	0,0000
0,9971	-0,0028	0,8537	0,019856	0,007657	0,010340	653,6	0,0000	2,5933	1,3504	abgel.	0,0000

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

1,0000 -0,0021 0,6504 0,0198560,0076570,010340498,0 0,0000 2,5933 1,3504 abgel. 0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P.
-49,0	-0,745	0,65184	0,044	0,528	0,004	0,528	0,124	-1,142	0,264	0,309
-48,0	-0,768	0,62443	0,044	0,527	0,004	0,527	0,127	-1,231	0,389	0,308
-47,0	-0,794	0,60170	0,051	1,000	0,004	1,000	0,129	-1,319	0,383	0,314
-46,0	-0,821	0,57881	0,051	1,000	0,004	1,000	0,134	-1,418	0,262	0,313
-45,0	-0,848	0,55546	0,052	1,000	0,004	1,000	0,136	-1,527	0,260	0,311
-44,0	-0,878	0,52948	0,052	1,000	0,004	1,000	0,142	-1,659	0,262	0,309
-43,0	-0,910	0,50051	0,052	1,000	0,004	1,000	0,148	-1,818	0,258	0,308
-42,0	-0,943	0,47843	0,053	1,000	0,004	1,000	0,153	-1,971	0,253	0,306
-41,0	-0,977	0,45750	0,053	1,000	0,004	1,000	0,157	-2,135	0,251	0,304
-40,0	-1,013	0,43469	0,053	1,000	0,004	1,000	0,162	-2,330	0,252	0,302
-39,0	-1,051	0,40975	0,053	1,000	0,004	1,000	0,169	-2,565	0,252	0,300
-38,0	-1,091	0,38636	0,053	1,000	0,005	1,000	0,177	-2,823	0,250	0,298
-37,0	-1,132	0,36311	0,053	0,987	0,005	1,000	0,184	-3,116	0,250	0,297
-36,0	-1,175	0,33986	0,053	0,983	0,005	1,000	0,195	-3,456	0,248	0,295
-35,0	-1,218	0,31868	0,053	0,981	0,005	1,000	0,203	-3,823	0,245	0,293
-34,0	-1,263	0,29777	0,052	0,978	0,005	1,000	0,212	-4,241	0,246	0,291
-33,0	-1,310	0,27485	0,052	0,976	0,005	1,000	0,225	-4,765	0,245	0,290
-32,0	-1,356	0,25559	0,052	0,974	0,005	1,000	0,236	-5,304	0,245	0,288
-31,0	-1,404	0,23247	0,052	0,969	0,006	1,000	0,255	-6,041	0,245	0,287
-30,0	-1,451	0,21256	0,051	0,966	0,006	1,000	0,271	-6,828	0,242	0,285
-29,0	-1,498	0,19278	0,051	0,962	0,007	1,000	0,290	-7,772	0,238	0,284
-28,0	-1,541	0,17742	0,050	0,959	0,007	1,000	0,303	-8,686	0,237	0,283
-27,0	-1,586	0,15764	0,050	0,956	0,007	1,000	0,329	-10,061	0,240	0,281
-26,0	-1,628	0,13941	0,049	0,948	0,008	1,000	0,357	-11,676	0,236	0,280
-25,0	-1,666	0,12214	0,049	0,938	0,008	1,000	0,387	-13,644	0,234	0,279
-24,0	-1,702	0,10496	0,048	0,931	0,010	1,000	0,424	-16,218	0,231	0,278
-23,0	-1,733	0,08927	0,047	0,918	0,011	1,000	0,465	-19,411	0,226	0,277
-22,0	-1,759	0,07403	0,047	0,907	0,013	1,000	0,515	-23,767	0,208	0,277
-21,0	-1,774	0,06293	0,046	0,897	0,013	1,000	0,555	-28,190	0,131	0,276
-20,0	-1,778	0,05387	0,045	0,874	0,014	1,000	0,593	-33,014	-1,676	0,275
-19,0	-1,775	0,04529	0,043	0,855	0,015	1,000	0,640	-39,201	0,406	0,274
-18,0	-1,762	0,03820	0,042	0,839	0,016	1,000	0,686	-46,116	0,317	0,274
-17,0	-1,732	0,03261	0,040	0,826	0,017	1,000	0,729	-53,096	0,294	0,273
-16,0	-1,689	0,02775	0,039	0,800	0,018	1,000	0,778	-60,869	0,285	0,273
-15,0	-1,635	0,02430	0,037	0,776	0,020	1,000	0,819	-67,292	0,282	0,273
-14,0	-1,570	0,02153	0,035	0,723	0,023	1,000	0,857	-72,958	0,279	0,272
-13,0	-1,496	0,01926	0,033	0,696	0,027	1,000	0,892	-77,672	0,277	0,272
-12,0	-1,411	0,01773	0,031	0,660	0,031	1,000	0,917	-79,595	0,275	0,272
-11,0	-1,317	0,01653	0,028	0,599	0,035	1,000	0,938	-79,687	0,274	0,272
-10,0	-1,217	0,01548	0,026	0,558	0,042	1,000	0,956	-78,576	0,273	0,271
-9,0	-1,108	0,01458	0,024	0,538	0,050	1,000	0,966	-75,979	0,272	0,271
-8,0	-0,994	0,01388	0,021	0,499	0,056	1,000	0,976	-71,596	0,272	0,271
-7,0	-0,876	0,01106	0,019	0,442	0,066	1,000	0,982	-79,229	0,272	0,271
-6,0	-0,756	0,01070	0,016	0,411	0,084	1,000	0,988	-70,606	0,271	0,271

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

-5,0	-0,633	0,01227	0,013	0,382	0,105	1,000	0,998	-51,616	0,271	0,271
-4,0	-0,508	0,01196	0,011	0,350	0,120	1,000	0,998	-42,506	0,271	0,271
-3,0	-0,382	0,01168	0,008	0,303	0,145	1,000	0,998	-32,708	0,271	0,271
-2,0	-0,255	0,01144	0,005	0,280	0,178	1,000	0,999	-22,298	0,271	0,271
-1,0	-0,128	0,01126	0,003	0,256	0,199	1,000	0,999	-11,341	0,271	0,271
0,0	0,000	0,01127	-0,000	0,227	0,227	1,000	0,999	0,000	0,271	0,250
1,0	0,128	0,01126	-0,003	0,199	0,256	1,000	0,999	11,344	0,271	0,271
2,0	0,255	0,01144	-0,005	0,178	0,280	1,000	1,000	22,303	0,271	0,271
3,0	0,382	0,01168	-0,008	0,145	0,303	1,000	0,999	32,719	0,271	0,271
4,0	0,508	0,01196	-0,011	0,120	0,350	1,000	0,999	42,522	0,271	0,271
5,0	0,634	0,01227	-0,013	0,105	0,382	1,000	1,000	51,639	0,271	0,271
6,0	0,756	0,01070	-0,016	0,084	0,411	0,988	1,000	70,606	0,271	0,271
7,0	0,876	0,01106	-0,019	0,066	0,442	0,982	1,000	79,229	0,272	0,271
8,0	0,994	0,01388	-0,021	0,056	0,499	0,976	1,000	71,596	0,272	0,271
9,0	1,108	0,01458	-0,024	0,050	0,538	0,966	1,000	75,979	0,272	0,271
10,0	1,217	0,01548	-0,026	0,042	0,558	0,956	1,000	78,576	0,273	0,271
11,0	1,317	0,01653	-0,028	0,035	0,599	0,938	1,000	79,687	0,274	0,272
12,0	1,411	0,01773	-0,031	0,031	0,660	0,917	1,000	79,595	0,275	0,272
13,0	1,496	0,01926	-0,033	0,027	0,696	0,892	1,000	77,672	0,277	0,272
14,0	1,570	0,02153	-0,035	0,023	0,723	0,857	1,000	72,958	0,279	0,272
15,0	1,635	0,02430	-0,037	0,020	0,776	0,819	1,000	67,292	0,282	0,273
16,0	1,689	0,02775	-0,039	0,018	0,800	0,778	1,000	60,869	0,285	0,273
17,0	1,732	0,03261	-0,040	0,017	0,826	0,729	1,000	53,096	0,294	0,273
18,0	1,762	0,03820	-0,042	0,016	0,839	0,686	1,000	46,116	0,317	0,274
19,0	1,775	0,04529	-0,043	0,015	0,855	0,640	1,000	39,201	0,406	0,274
20,0	1,778	0,05387	-0,045	0,014	0,874	0,593	1,000	33,014	-1,676	0,275
21,0	1,774	0,06293	-0,046	0,013	0,897	0,555	1,000	28,190	0,131	0,276
22,0	1,759	0,07403	-0,047	0,013	0,907	0,515	1,000	23,767	0,208	0,277
23,0	1,733	0,08927	-0,047	0,011	0,918	0,465	1,000	19,411	0,226	0,277
24,0	1,702	0,10496	-0,048	0,010	0,931	0,424	1,000	16,218	0,231	0,278
25,0	1,666	0,12214	-0,049	0,008	0,938	0,387	1,000	13,644	0,234	0,279
26,0	1,628	0,13941	-0,049	0,008	0,948	0,357	1,000	11,676	0,236	0,280
27,0	1,586	0,15764	-0,050	0,007	0,956	0,329	1,000	10,061	0,240	0,281
28,0	1,541	0,17742	-0,050	0,007	0,959	0,303	1,000	8,686	0,237	0,283
29,0	1,498	0,19278	-0,051	0,007	0,962	0,290	1,000	7,772	0,238	0,284
30,0	1,451	0,21256	-0,051	0,006	0,966	0,271	1,000	6,828	0,242	0,285
31,0	1,404	0,23247	-0,052	0,006	0,969	0,255	1,000	6,041	0,245	0,287
32,0	1,356	0,25559	-0,052	0,005	0,974	0,236	1,000	5,304	0,245	0,288
33,0	1,310	0,27485	-0,052	0,005	0,976	0,225	1,000	4,765	0,245	0,290
34,0	1,263	0,29777	-0,052	0,005	0,978	0,212	1,000	4,241	0,246	0,291
35,0	1,218	0,31868	-0,053	0,005	0,981	0,203	1,000	3,823	0,245	0,293
36,0	1,175	0,33986	-0,053	0,005	0,983	0,195	1,000	3,456	0,248	0,295
37,0	1,132	0,36311	-0,053	0,005	0,987	0,184	1,000	3,116	0,250	0,297
38,0	1,091	0,38636	-0,053	0,005	0,999	0,177	0,999	2,823	0,250	0,298
39,0	1,051	0,40975	-0,053	0,004	0,999	0,169	0,999	2,565	0,252	0,300
40,0	1,013	0,43469	-0,053	0,004	0,998	0,162	0,999	2,330	0,252	0,302
41,0	0,977	0,45750	-0,053	0,004	0,998	0,157	0,999	2,135	0,251	0,304
42,0	0,943	0,47843	-0,053	0,004	0,999	0,153	0,999	1,971	0,253	0,306
43,0	0,910	0,50051	-0,052	0,004	0,999	0,148	0,999	1,818	0,258	0,308

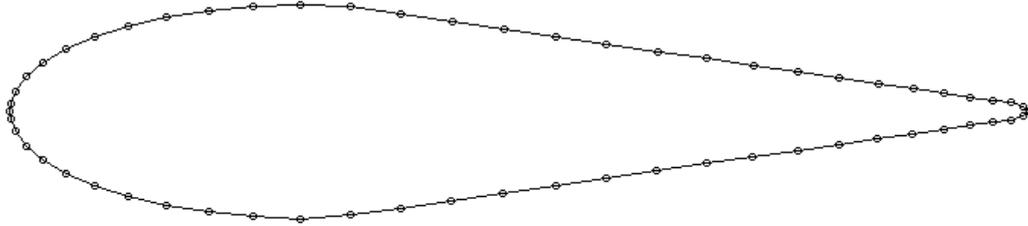
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

44,0	0,878	0,52948	-0,052	0,004	0,999	0,142	0,999	1,659	0,262	0,309
45,0	0,848	0,55546	-0,052	0,004	0,999	0,136	0,999	1,527	0,260	0,311
46,0	0,821	0,57881	-0,051	0,004	0,999	0,134	0,999	1,418	0,262	0,313
47,0	0,794	0,60170	-0,051	0,004	0,999	0,129	0,999	1,319	0,383	0,314
48,0	0,768	0,62443	-0,044	0,004	0,527	0,127	0,527	1,231	0,389	0,308
49,0	0,745	0,65184	-0,044	0,004	0,528	0,124	0,528	1,142	0,267	0,309
50,0	0,722	0,67873	-0,044	0,004	0,528	0,121	0,528	1,064	0,270	0,311

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Reihenuntersuchung

Symmetrische Profile (2) ERpLK 00 30 20



1,0000	0,0000
0,9942	0,0050
0,9824	0,0087
0,9649	0,0107
0,9430	0,0138
0,9168	0,0176
0,8864	0,0222
0,8521	0,0271
0,8142	0,0325
0,7733	0,0386
0,7295	0,0447
0,6834	0,0516
0,6354	0,0586
0,5858	0,0655
0,5354	0,0731
0,4845	0,0803
0,4335	0,0878
0,3831	0,0952
0,3336	0,1021
0,2852	0,1049
0,2387	0,1025
0,1947	0,0983
0,1538	0,0917
0,1165	0,0832
0,0834	0,0731
0,0551	0,0612
0,0321	0,0479
0,0151	0,0338
0,0050	0,0194
0,0008	0,0074
-0,000	-0,0003
0,0008	-0,0079
0,0050	-0,0199
0,0152	-0,0342
0,0321	-0,0484
0,0551	-0,0616

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0835-0,0734
0,1165-0,0838
0,1538-0,0922
0,1946-0,0989
0,2386-0,1031
0,2852-0,1057
0,3334-0,1019
0,3830-0,0950
0,4334-0,0876
0,4843-0,0801
0,5353-0,0729
0,5857-0,0653
0,6352-0,0584
0,6832-0,0514
0,7293-0,0445
0,7731-0,0383
0,8141-0,0323
0,8519-0,0270
0,8862-0,0219
0,9166-0,0175
0,9428-0,0136
0,9647-0,0105
0,9822-0,0086
0,9939-0,0046
1,0000 0,0000

x/L	y/L	v/V
1,00000	0,00000	0,52055
0,99420	0,00500	1,06981
0,98240	0,00870	1,06053
0,96490	0,01070	0,94146
0,94300	0,01380	0,95416
0,91680	0,01760	0,96160
0,88640	0,02220	0,98368
0,85210	0,02710	0,99049
0,81420	0,03250	0,99793
0,77330	0,03860	1,02210
0,72950	0,04470	1,02202
0,68340	0,05160	1,04725
0,63540	0,05860	1,06585
0,58580	0,06550	1,07043
0,53540	0,07310	1,10711
0,48450	0,08030	1,12223
0,43350	0,08780	1,16063
0,38310	0,09520	1,21324
0,33360	0,10210	1,32862
0,28520	0,10490	1,38789
0,23870	0,10250	1,33261
0,19470	0,09830	1,34020
0,15380	0,09170	1,32143
0,11650	0,08320	1,29991

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,08340	0,07310	1,27904
0,05510	0,06120	1,22106
0,03210	0,04790	1,12307
0,01510	0,03380	0,96494
0,00500	0,01940	0,64229
0,00080	0,00740	0,28248
-0,00000	-0,00030	0,00802
0,00080	-0,00790	0,26374
0,00500	-0,01990	0,62903
0,01520	-0,03420	0,94092
0,03210	-0,04840	1,11611
0,05510	-0,06160	1,21007
0,08350	-0,07340	1,25695
0,11650	-0,08380	1,30123
0,15380	-0,09220	1,31049
0,19460	-0,09890	1,33734
0,23860	-0,10310	1,32583
0,28520	-0,10570	1,40565
0,33340	-0,10190	1,30199
0,38300	-0,09500	1,20396
0,43340	-0,08760	1,15277
0,48430	-0,08010	1,11466
0,53530	-0,07290	1,10052
0,58570	-0,06530	1,06414
0,63520	-0,05840	1,05912
0,68320	-0,05140	1,04065
0,72930	-0,04450	1,01651
0,77310	-0,03830	1,01104
0,81410	-0,03230	0,99099
0,85190	-0,02700	0,98789
0,88620	-0,02190	0,96668
0,91660	-0,01750	0,95846
0,94280	-0,01360	0,94029
0,96470	-0,01050	0,92420
0,98220	-0,00860	1,05607
0,99390	-0,00460	1,00165
1,00000	0,00000	0,52055

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	Cp* [-]	M krit.
-20,0	-1,594	0,19219	0,020	-10,35	0,245
-18,0	-1,567	0,14558	0,021	-8,665	0,266
-16,0	-1,545	0,09376	0,022	-7,089	0,291
-14,0	-1,422	0,07303	0,020	-5,692	0,321
-12,0	-1,263	0,05884	0,017	-4,564	0,352
-10,0	-1,083	0,04611	0,014	-3,529	0,392
-8,0	-0,892	0,03395	0,011	-2,590	0,442
-6,0	-0,673	0,02781	0,007	-1,880	0,497
-4,0	-0,425	0,03053	0,003	-1,377	0,551
-2,0	-0,206	0,02494	-0,000	-1,175	0,578
-0,0	0,016	0,02379	-0,003	-0,976	0,610
2,0	0,239	0,02639	-0,007	-1,119	0,586
4,0	0,460	0,02927	-0,010	-1,389	0,549
6,0	0,677	0,03374	-0,014	-1,892	0,496
8,0	0,927	0,03397	-0,018	-2,713	0,435
10,0	1,114	0,04487	-0,021	-3,675	0,385
12,0	1,292	0,05797	-0,024	-4,735	0,347
14,0	1,445	0,07351	-0,027	-5,889	0,316
16,0	1,574	0,09332	-0,029	-7,129	0,290
18,0	1,570	0,15495	-0,024	-8,675	0,266
20,0	1,603	0,19616	-0,022	-10,35	0,245

x/l [-]	y/l [-]	v/V [-]	δ_1 [-]	δ_2 [-]	δ_3 [-]	Re δ_2 [-]	C_f [-]	H_12 [-]	H_32 [-]	Zust. [-]	y1 [%]
1,0000	0,0000	0,5206	0,004245	0,003110	0,002192	161,9	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,9942	0,0050	1,0698	0,004245	0,003110	0,002192	332,7	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,9824	0,0087	1,0605	0,004245	0,003110	0,002192	329,8	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,9649	0,0107	0,9415	0,004245	0,003110	0,002192	292,8	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,9430	0,0138	0,9542	0,004245	0,003110	0,002192	296,7	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,9168	0,0176	0,9616	0,004245	0,003110	0,002192	299,1	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,8864	0,0222	0,9837	0,004245	0,003110	0,002192	305,9	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,8521	0,0271	0,9905	0,004245	0,003110	0,002192	308,0	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,8142	0,0325	0,9979	0,004245	0,003110	0,002192	310,3	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,7733	0,0386	1,0221	0,004245	0,003110	0,002192	317,9	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,7295	0,0447	1,0220	0,004245	0,003110	0,002192	317,8	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,6834	0,0516	1,0473	0,004245	0,003110	0,002192	325,7	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,6354	0,0586	1,0659	0,004245	0,003110	0,002192	331,5	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,5858	0,0655	1,0704	0,004245	0,003110	0,002192	332,9	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,5354	0,0731	1,1071	0,004245	0,003110	0,002192	344,3	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,4845	0,0803	1,1222	0,004245	0,003110	0,002192	349,0	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,4335	0,0878	1,1606	0,004245	0,003110	0,002192	360,9	0,0000	1,3649	0,7048	abgel.	0,0000
0,3831	0,0952	1,2132	0,004245	0,003110	0,002192	377,3	0,0000	1,3649	0,7048	turb.	0,0000
0,3336	0,1021	1,3286	0,001846	0,000806	0,001299	112,0	0,0059	2,2904	1,6118	lam.	0,0184
0,2852	0,1049	1,3879	0,002180	0,000828	0,001298	110,3	0,0038	2,6343	1,5682	lam.	0,0230
0,2387	0,1025	1,3326	0,001757	0,000710	0,001127	95,2	0,0055	2,4732	1,5868	lam.	0,0191
0,1947	0,0983	1,3402	0,001569	0,000634	0,001005	83,8	0,0062	2,4758	1,5865	lam.	0,0180
0,1538	0,0917	1,3214	0,001368	0,000548	0,000869	71,3	0,0071	2,4945	1,5841	lam.	0,0168
0,1165	0,0832	1,2999	0,001087	0,000452	0,000721	57,9	0,0099	2,4049	1,5957	lam.	0,0142
0,0834	0,0731	1,2790	0,000873	0,000370	0,000594	45,4	0,0134	2,3566	1,6023	lam.	0,0122
0,0551	0,0612	1,2211	0,000672	0,000290	0,000466	32,5	0,0198	2,3209	1,6075	lam.	0,0101
0,0321	0,0479	1,1231	0,000470	0,000209	0,000338	20,2	0,0350	2,2487	1,6181	lam.	0,0076
0,0151	0,0338	0,9649	0,000385	0,000172	0,000279	11,2	0,0641	2,2361	1,6200	lam.	0,0056
0,0050	0,0194	0,6423	0,000344	0,000154	0,000250	4,4	0,1643	2,2352	1,6202	lam.	0,0035
0,0008	0,0074	0,2825	0,000322	0,000144	0,000233	0,9	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
-0,0000	-0,0003	0,0080	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0008	-0,0079	0,2637	0,000330	0,000147	0,000239	0,9	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
0,0050	-0,0199	0,6290	0,000355	0,000159	0,000257	4,2	0,1699	2,2352	1,6202	lam.	0,0034

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0152	-0,0342	0,9409	0,000382	0,000171	0,000277	10,8	0,0665	2,2358	1,6201	lam.	0,0055
0,0321	-0,0484	1,1161	0,000478	0,000213	0,000344	20,3	0,0348	2,2487	1,6181	lam.	0,0076
0,0551	-0,0616	1,2101	0,000657	0,000285	0,000459	32,2	0,0204	2,3041	1,6099	lam.	0,0099
0,0835	-0,0734	1,2569	0,000871	0,000368	0,000589	44,7	0,0135	2,3674	1,6008	lam.	0,0122
0,1165	-0,0838	1,3012	0,001119	0,000460	0,000732	57,9	0,0095	2,4322	1,5921	lam.	0,0145
0,1538	-0,0922	1,3105	0,001281	0,000530	0,000846	69,0	0,0082	2,4157	1,5942	lam.	0,0157
0,1946	-0,0989	1,3373	0,001620	0,000640	0,001010	83,9	0,0057	2,5319	1,5795	lam.	0,0187
0,2386	-0,1031	1,3258	0,001708	0,000701	0,001115	93,8	0,0058	2,4384	1,5912	lam.	0,0185
0,2852	-0,1057	1,4057	0,002207	0,000829	0,001298	109,9	0,0037	2,6627	1,5655	lam.	0,0234
0,3334	-0,1019	1,3020	0,001702	0,000767	0,001246	107,9	0,0068	2,2175	1,6232	lam.	0,0172
0,3830	-0,0950	1,2040	0,004187	0,003538	0,002181	425,9	0,0000	1,1835	0,6165	turb.	0,0000
0,4334	-0,0876	1,1528	0,004187	0,003538	0,002181	407,8	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,4843	-0,0801	1,1147	0,004187	0,003538	0,002181	394,3	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,5353	-0,0729	1,1005	0,004187	0,003538	0,002181	389,3	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,5857	-0,0653	1,0641	0,004187	0,003538	0,002181	376,4	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,6352	-0,0584	1,0591	0,004187	0,003538	0,002181	374,7	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,6832	-0,0514	1,0407	0,004187	0,003538	0,002181	368,1	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,7293	-0,0445	1,0165	0,004187	0,003538	0,002181	359,6	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,7731	-0,0383	1,0110	0,004187	0,003538	0,002181	357,7	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,8141	-0,0323	0,9910	0,004187	0,003538	0,002181	350,6	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,8519	-0,0270	0,9879	0,004187	0,003538	0,002181	349,5	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,8862	-0,0219	0,9667	0,004187	0,003538	0,002181	342,0	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,9166	-0,0175	0,9585	0,004187	0,003538	0,002181	339,1	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,9428	-0,0136	0,9403	0,004187	0,003538	0,002181	332,6	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,9647	-0,0105	0,9242	0,004187	0,003538	0,002181	326,9	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,9822	-0,0086	1,0561	0,004187	0,003538	0,002181	373,6	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
0,9939	-0,0046	1,0016	0,004187	0,003538	0,002181	354,3	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000
1,0000	0,0000	0,5206	0,004187	0,003538	0,002181	184,1	0,0000	1,1835	0,6165	abgel.	0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P.
-49,0	-0,702	0,80574	0,034	1,000	0,006	1,000	0,075	-0,871	0,258	0,299
-48,0	-0,729	0,76427	0,035	1,000	0,006	1,000	0,076	-0,954	0,257	0,298
-47,0	-0,758	0,75825	0,035	1,000	0,006	1,000	0,078	-1,000	0,257	0,296
-46,0	-0,789	0,71462	0,035	1,000	0,006	1,000	0,081	-1,104	0,256	0,295
-45,0	-0,820	0,67689	0,035	1,000	0,007	1,000	0,082	-1,212	0,254	0,293
-44,0	-0,852	0,64603	0,035	1,000	0,007	1,000	0,085	-1,319	0,256	0,292
-43,0	-0,886	0,62109	0,036	1,000	0,007	1,000	0,089	-1,427	0,256	0,290
-42,0	-0,922	0,59183	0,036	1,000	0,007	1,000	0,094	-1,557	0,254	0,289
-41,0	-0,959	0,56721	0,036	1,000	0,007	1,000	0,098	-1,691	0,256	0,287
-40,0	-1,000	0,52791	0,036	1,000	0,008	1,000	0,108	-1,893	0,255	0,286
-39,0	-1,041	0,50191	0,036	1,000	0,008	1,000	0,114	-2,074	0,251	0,285
-38,0	-1,084	0,47226	0,036	1,000	0,009	1,000	0,119	-2,296	0,243	0,284
-37,0	-1,127	0,45596	0,036	1,000	0,008	1,000	0,117	-2,471	0,247	0,282
-36,0	-1,175	0,42208	0,036	1,000	0,009	1,000	0,130	-2,785	0,253	0,281
-35,0	-1,224	0,39851	0,036	1,000	0,009	1,000	0,138	-3,071	0,246	0,279
-34,0	-1,272	0,37438	0,036	1,000	0,009	1,000	0,143	-3,398	0,246	0,278
-33,0	-1,323	0,34820	0,036	1,000	0,010	1,000	0,154	-3,800	0,248	0,277
-32,0	-1,376	0,32228	0,036	1,000	0,010	1,000	0,167	-4,268	0,253	0,276
-31,0	-1,432	0,28952	0,036	1,000	0,011	1,000	0,195	-4,947	0,249	0,275
-30,0	-1,483	0,26662	0,036	1,000	0,011	1,000	0,206	-5,563	0,244	0,274
-29,0	-1,535	0,24271	0,035	1,000	0,012	1,000	0,224	-6,325	0,258	0,273
-28,0	-1,604	0,20009	0,036	1,000	0,012	1,000	0,301	-8,017	0,254	0,273
-27,0	-1,639	0,18354	0,036	1,000	0,012	1,000	0,313	-8,932	0,228	0,272
-26,0	-1,671	0,16747	0,035	1,000	0,013	1,000	0,327	-9,978	0,222	0,271
-25,0	-1,697	0,15151	0,034	1,000	0,014	1,000	0,340	-11,20	0,213	0,270
-24,0	-1,718	0,13544	0,033	1,000	0,016	1,000	0,354	-12,68	0,189	0,269
-23,0	-1,730	0,12457	0,032	1,000	0,018	1,000	0,361	-13,88	0,123	0,269

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

-22,0	-1,735	0,11356	0,031	1,000	0,019	1,000	0,372	-15,27	-1,815	0,268
-21,0	-1,731	0,10236	0,030	1,000	0,019	1,000	0,380	-16,90	0,406	0,267
-20,0	-1,720	0,09246	0,029	1,000	0,019	1,000	0,394	-18,60	0,326	0,267
-19,0	-1,699	0,08326	0,028	1,000	0,021	1,000	0,406	-20,40	0,299	0,266
-18,0	-1,669	0,07449	0,026	1,000	0,022	1,000	0,420	-22,41	0,287	0,266
-17,0	-1,630	0,06618	0,025	1,000	0,024	1,000	0,435	-24,63	0,280	0,265
-16,0	-1,584	0,05768	0,024	1,000	0,026	1,000	0,458	-27,46	0,276	0,265
-15,0	-1,527	0,05072	0,022	1,000	0,028	1,000	0,477	-30,11	0,273	0,265
-14,0	-1,459	0,04503	0,021	1,000	0,031	1,000	0,495	-32,39	0,270	0,264
-13,0	-1,391	0,03825	0,020	0,378	0,038	1,000	0,548	-36,37	0,269	0,264
-12,0	-1,309	0,03329	0,018	0,371	0,046	1,000	0,573	-39,30	0,268	0,264
-11,0	-1,234	0,02641	0,017	0,365	0,055	1,000	0,654	-46,73	0,268	0,264
-10,0	-1,147	0,02202	0,015	0,360	0,069	1,000	0,714	-52,06	0,268	0,263
-9,0	-1,061	0,01776	0,014	0,355	0,084	1,000	0,814	-59,75	0,268	0,263
-8,0	-0,976	0,01365	0,012	0,352	0,148	1,000	0,955	-71,46	0,268	0,262
-7,0	-0,863	0,01164	0,010	0,349	0,221	1,000	0,997	-74,14	0,267	0,262
-6,0	-0,740	0,01113	0,008	0,346	0,237	1,000	0,997	-66,51	0,267	0,261
-5,0	-0,616	0,00997	0,006	0,343	0,305	1,000	0,997	-61,76	0,267	0,260
-4,0	-0,490	0,00987	0,004	0,341	0,307	1,000	0,998	-49,62	0,266	0,258
-3,0	-0,363	0,01007	0,002	0,340	0,309	1,000	0,998	-36,05	0,266	0,255
-2,0	-0,236	0,00993	-0,000	0,337	0,310	1,000	0,998	-23,77	0,266	0,249
-1,0	-0,109	0,00991	-0,002	0,335	0,312	1,000	0,998	-10,97	0,266	0,228
0,0	0,019	0,00993	-0,004	0,332	0,313	1,000	0,998	1,883	0,266	0,488
1,0	0,146	0,01000	-0,007	0,327	0,313	1,000	0,998	14,613	0,266	0,295
2,0	0,273	0,01009	-0,009	0,323	0,315	1,000	0,998	27,092	0,266	0,282
3,0	0,401	0,01018	-0,011	0,321	0,316	1,000	0,998	39,351	0,266	0,277
4,0	0,527	0,01038	-0,013	0,316	0,319	1,000	0,997	50,785	0,266	0,274
5,0	0,653	0,01053	-0,015	0,313	0,323	1,000	0,997	61,970	0,266	0,273
6,0	0,777	0,01184	-0,017	0,239	0,326	1,000	0,997	65,653	0,266	0,272
7,0	0,900	0,01235	-0,019	0,220	0,330	1,000	0,998	72,861	0,266	0,271
8,0	1,007	0,01435	-0,021	0,115	0,337	0,940	0,998	70,174	0,266	0,270
9,0	1,106	0,01649	-0,022	0,100	0,344	0,869	0,998	67,090	0,266	0,270
10,0	1,195	0,01940	-0,024	0,086	0,354	0,782	0,998	61,574	0,265	0,270
11,0	1,272	0,02458	-0,025	0,065	0,364	0,686	0,998	51,754	0,264	0,269
12,0	1,338	0,03247	-0,026	0,047	0,380	0,583	0,998	41,220	0,265	0,269
13,0	1,417	0,03737	-0,027	0,030	0,995	0,549	0,995	37,914	0,267	0,269
14,0	1,485	0,04465	-0,028	0,026	0,995	0,508	0,995	33,272	0,268	0,269
15,0	1,550	0,05154	-0,029	0,025	0,995	0,478	0,995	30,081	0,270	0,269
16,0	1,611	0,05831	-0,031	0,024	0,995	0,460	0,995	27,638	0,273	0,269
17,0	1,659	0,06603	-0,032	0,022	0,995	0,441	0,995	25,130	0,277	0,269
18,0	1,698	0,07414	-0,033	0,021	0,995	0,426	0,995	22,898	0,284	0,269
19,0	1,726	0,08274	-0,034	0,020	0,995	0,411	0,995	20,861	0,296	0,270
20,0	1,746	0,09162	-0,035	0,020	0,995	0,398	0,995	19,055	0,321	0,270
21,0	1,755	0,10213	-0,036	0,019	0,995	0,383	0,995	17,186	0,403	0,271
22,0	1,759	0,11234	-0,037	0,019	0,995	0,377	0,995	15,660	-1,361	0,271
23,0	1,754	0,12321	-0,038	0,018	0,996	0,368	0,996	14,236	0,141	0,272
24,0	1,742	0,13373	-0,039	0,017	0,996	0,360	0,996	13,023	0,194	0,272
25,0	1,722	0,14704	-0,040	0,017	0,996	0,351	0,996	11,711	0,215	0,273
26,0	1,696	0,15983	-0,041	0,017	0,996	0,340	0,996	10,610	0,230	0,274
27,0	1,659	0,17913	-0,041	0,015	0,995	0,321	0,996	9,263	0,240	0,275
28,0	1,611	0,19855	-0,042	0,014	0,995	0,301	0,995	8,112	0,257	0,276
29,0	1,543	0,23551	-0,040	0,013	0,995	0,236	0,995	6,550	0,260	0,276

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

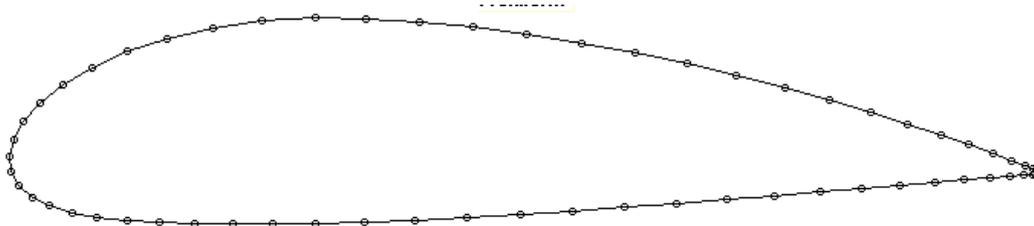
30,0	1,489	0,26215	-0,040	0,012	0,995	0,215	0,995	5,680	0,251	0,277
31,0	1,434	0,28902	-0,040	0,011	0,995	0,195	0,995	4,963	0,251	0,278
32,0	1,381	0,31222	-0,040	0,011	0,995	0,180	0,995	4,423	0,253	0,279
33,0	1,326	0,34262	-0,040	0,010	0,995	0,161	0,995	3,872	0,254	0,280
34,0	1,275	0,36452	-0,040	0,010	0,995	0,149	0,995	3,497	0,255	0,281
35,0	1,223	0,39938	-0,039	0,010	0,995	0,134	0,995	3,062	0,255	0,282
36,0	1,174	0,42859	-0,039	0,009	0,995	0,125	0,995	2,739	0,254	0,283
37,0	1,127	0,45225	-0,039	0,009	0,995	0,116	0,995	2,491	0,252	0,285
38,0	1,082	0,47455	-0,039	0,009	0,995	0,113	0,995	2,281	0,249	0,286
39,0	1,040	0,50849	-0,039	0,009	0,995	0,110	0,995	2,045	0,252	0,288
40,0	0,998	0,53982	-0,039	0,008	0,996	0,104	0,996	1,849	0,255	0,289
41,0	0,959	0,56280	-0,039	0,008	0,995	0,100	0,995	1,704	0,256	0,290
42,0	0,921	0,60176	-0,038	0,008	0,995	0,095	0,995	1,531	0,258	0,292
43,0	0,886	0,63414	-0,038	0,007	0,995	0,091	0,995	1,397	0,255	0,293
44,0	0,853	0,65131	-0,038	0,007	0,994	0,091	0,995	1,309	0,256	0,295
45,0	0,821	0,68278	-0,038	0,007	0,994	0,086	0,995	1,202	0,262	0,296
46,0	0,789	0,71202	-0,037	0,007	0,995	0,083	0,995	1,108	0,264	0,297
47,0	0,758	0,73776	-0,037	0,006	0,994	0,079	0,995	1,027	0,263	0,299
48,0	0,729	0,78643	-0,037	0,006	0,995	0,078	0,995	0,926	0,338	0,300
49,0	0,701	0,80141	-0,032	0,005	0,535	0,075	0,536	0,875	0,342	0,296
50,0	0,676	0,84554	-0,032	0,005	0,536	0,075	0,537	0,799	0,258	0,297

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Reihenuntersuchung

Asymmetrische Profile

(3) NACA 5 3 20



1,0003 0,0021
0,9976 0,0031
0,9897 0,0061
0,9766 0,0111
0,9584 0,0178
0,9352 0,0261
0,9073 0,0357
0,8750 0,0464
0,8386 0,0578
0,7984 0,0697
0,7548 0,0818
0,7083 0,0937
0,6594 0,1052
0,6086 0,1159
0,5565 0,1257
0,5036 0,1341
0,4505 0,1409
0,3979 0,1460
0,3464 0,1491
0,2963 0,1500
0,2445 0,1475
0,1961 0,1408
0,1519 0,1304
0,1125 0,1171
0,0785 0,1016
0,0502 0,0846
0,0280 0,0669
0,0118 0,0491
0,0019 0,0318
-0,002 0,0153
0,0000 0,0000
0,0075 -0,0135
0,0200 -0,0246
0,0371 -0,0334
0,0585 -0,0401
0,0838 -0,0449
0,1125 -0,0481
0,1443 -0,0498

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,1790-0,0506
0,2161-0,0506
0,2555-0,0503
0,2970-0,0500
0,3446-0,0495
0,3941-0,0479
0,4449-0,0454
0,4964-0,0422
0,5480-0,0386
0,5993-0,0348
0,6496-0,0308
0,6984-0,0269
0,7452-0,0231
0,7894-0,0195
0,8305-0,0161
0,8681-0,0131
0,9017-0,0103
0,9308-0,0079
0,9552-0,0059
0,9745-0,0042
0,9884-0,0030
0,9969-0,0023
0,9997-0,0021

x/L	y/L	v/V
1,00030	0,00210	0,46650
0,99760	0,00310	0,27529
0,98970	0,00610	0,31540
0,97660	0,01110	0,21015
0,95840	0,01780	0,12437
0,93520	0,02610	0,03564
0,90730	0,03570	-0,04586
0,87500	0,04640	-0,13394
0,83860	0,05780	-0,21208
0,79840	0,06970	-0,29239
0,75480	0,08180	-0,37572
0,70830	0,09370	-0,45178
0,65940	0,10520	-0,53653
0,60860	0,11590	-0,61089
0,55650	0,12570	-0,70549
0,50360	0,13410	-0,78930
0,45050	0,14090	-0,87083
0,39790	0,14600	-0,96919
0,34640	0,14910	-1,07203
0,29630	0,15000	-1,21670
0,24450	0,14750	-1,33290
0,19610	0,14080	-1,33157
0,15190	0,13040	-1,24512
0,11250	0,11710	-1,10876
0,07850	0,10160	-0,90945
0,05020	0,08460	-0,64670

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,02800	0,06690	-0,30520
0,01180	0,04910	0,10687
0,00190	0,03180	0,59713
-0,00200	0,01530	0,96619
0,00000	0,00000	0,87819
0,00750	-0,01350	0,36461
0,02000	-0,02460	-0,10087
0,03710	-0,03340	-0,32088
0,05850	-0,04010	-0,37547
0,08380	-0,04490	-0,35042
0,11250	-0,04810	-0,31019
0,14430	-0,04980	-0,23385
0,17900	-0,05060	-0,18556
0,21610	-0,05060	-0,12830
0,25550	-0,05030	-0,09267
0,29700	-0,05000	-0,08645
0,34460	-0,04950	-0,10650
0,39410	-0,04790	-0,08576
0,44490	-0,04540	-0,05807
0,49640	-0,04220	-0,02493
0,54800	-0,03860	0,00554
0,59930	-0,03480	0,02948
0,64960	-0,03080	0,06094
0,69840	-0,02690	0,08382
0,74520	-0,02310	0,10839
0,78940	-0,01950	0,13088
0,83050	-0,01610	0,15981
0,86810	-0,01310	0,17794
0,90170	-0,01030	0,21128
0,93080	-0,00790	0,24290
0,95520	-0,00590	0,27442
0,97450	-0,00420	0,32857
0,98840	-0,00300	0,38383
0,99690	-0,00230	0,33184
0,99970	-0,00210	0,46650

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	Cp* [-]	M krit. [-]
-20,0	-1,119	0,20489	-0,035	-11,57	0,232
-18,0	-1,048	0,17026	-0,036	-9,790	0,252
-16,0	-0,948	0,13915	-0,038	-8,120	0,274
-14,0	-0,819	0,11167	-0,041	-6,571	0,301
-12,0	-0,664	0,08942	-0,045	-5,149	0,335
-10,0	-0,488	0,07044	-0,050	-3,916	0,376
-8,0	-0,295	0,05458	-0,057	-2,952	0,421
-6,0	-0,106	0,02285	-0,087	-2,084	0,479
-4,0	0,147	0,02181	-0,093	-1,343	0,555
-2,0	0,404	0,02252	-0,098	-1,097	0,590
-0,0	0,658	0,02261	-0,103	-1,333	0,557
2,0	0,893	0,02412	-0,108	-1,614	0,524
4,0	1,129	0,02585	-0,113	-1,906	0,495
6,0	1,349	0,02962	-0,117	-2,258	0,465
8,0	1,545	0,03558	-0,120	-2,703	0,435
10,0	1,730	0,04386	-0,124	-3,317	0,402
12,0	1,893	0,05506	-0,128	-4,247	0,363
14,0	2,040	0,06942	-0,133	-5,283	0,331
16,0	2,134	0,09120	-0,137	-6,397	0,305
18,0	2,183	0,11934	-0,139	-7,581	0,282
20,0	2,199	0,14916	-0,142	-8,831	0,264

x/l [-]	y/l [-]	v/V [-]	δ_1 [-]	δ_2 [-]	δ_3 [-]	Re δ_2 [-]	C _f [-]	H ₁₂ [-]	H ₃₂ [-]	Zust. [-]	y1 [%]
1,0003	0,0021	0,7304	0,020334	0,011869	0,010546	869,0	0,0000	1,7133	0,8886	abgel.	0,0000
0,9976	0,0031	0,8513	0,020334	0,011869	0,010546	1012,8	0,0000	1,7133	0,8886	abgel.	0,0000
0,9897	0,0061	0,8274	0,020334	0,011869	0,010546	984,4	0,0000	1,7133	0,8886	abgel.	0,0000
0,9766	0,0111	0,8887	0,020334	0,011869	0,010546	1057,3	0,0000	1,7133	0,8886	abgel.	0,0000
0,9584	0,0178	0,9358	0,020334	0,011869	0,010546	1113,3	0,0000	1,7133	0,8886	abgel.	0,0000
0,9352	0,0261	0,9820	0,020334	0,011869	0,010546	1168,3	0,0000	1,7133	0,8886	turb.	0,0000
0,9073	0,0357	1,0227	0,009864	0,005161	0,008166	550,6	0,0019	1,9112	1,5822	turb.	0,0321
0,8750	0,0464	1,0649	0,007988	0,004492	0,007244	495,7	0,0024	1,7782	1,6126	turb.	0,0286
0,8386	0,0578	1,1009	0,006662	0,003932	0,006428	448,1	0,0029	1,6940	1,6347	turb.	0,0265
0,7984	0,0697	1,1368	0,005631	0,003442	0,005685	404,7	0,0032	1,6360	1,6514	turb.	0,0250
0,7548	0,0818	1,1729	0,004902	0,003051	0,005066	368,4	0,0034	1,6069	1,6604	turb.	0,0241
0,7083	0,0937	1,2049	0,004217	0,002666	0,004448	331,2	0,0037	1,5821	1,6684	turb.	0,0233
0,6594	0,1052	1,2396	0,003731	0,002360	0,003938	300,2	0,0038	1,5809	1,6687	turb.	0,0230
0,6086	0,1159	1,2692	0,003206	0,002034	0,003398	266,2	0,0039	1,5760	1,6704	turb.	0,0226
0,5565	0,1257	1,3059	0,002828	0,001766	0,002937	236,8	0,0039	1,6007	1,6625	turb.	0,0228
0,5036	0,1341	1,3376	0,002552	0,001533	0,002519	210,1	0,0036	1,6646	1,6432	turb.	0,0237
0,4505	0,1409	1,3678	0,002341	0,001310	0,002110	184,2	0,0030	1,7870	1,6108	turb.	0,0257
0,3979	0,1460	1,4033	0,002339	0,001121	0,001737	161,7	0,0020	2,0869	1,5494	turb.	0,0317
0,3464	0,1491	1,4395	0,002786	0,000923	0,001420	137,7	0,0017	3,0185	1,5384	lam.	0,0341
0,2963	0,1500	1,4889	0,001934	0,000752	0,001184	115,1	0,0039	2,5730	1,5747	lam.	0,0225
0,2445	0,1475	1,5274	0,001584	0,000645	0,001025	98,8	0,0054	2,4561	1,5889	lam.	0,0192
0,1961	0,1408	1,5269	0,001363	0,000564	0,000899	84,7	0,0066	2,4171	1,5939	lam.	0,0174
0,1519	0,1304	1,4984	0,001158	0,000487	0,000778	70,8	0,0083	2,3792	1,5990	lam.	0,0155
0,1125	0,1171	1,4522	0,000979	0,000417	0,000668	57,7	0,0106	2,3504	1,6030	lam.	0,0137
0,0785	0,1016	1,3818	0,000810	0,000350	0,000562	45,0	0,0143	2,3174	1,6077	lam.	0,0118
0,0502	0,0846	1,2832	0,000659	0,000288	0,000464	32,9	0,0202	2,2910	1,6116	lam.	0,0099
0,0280	0,0669	1,1425	0,000509	0,000226	0,000366	21,6	0,0326	2,2504	1,6178	lam.	0,0078
0,0118	0,0491	0,9451	0,000397	0,000178	0,000288	11,3	0,0632	2,2360	1,6200	lam.	0,0056
0,0019	0,0318	0,6347	0,000111	0,000050	0,000080	1,0	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
-0,0020	0,0153	0,1839	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0000	0,0000	0,3490	0,000112	0,000050	0,000081	1,0	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
0,0075	-0,0135	0,7971	0,000615	0,000274	0,000443	9,6	0,0733	2,2482	1,6181	lam.	0,0052
0,0200	-0,0246	1,0492	0,000384	0,000173	0,000280	13,8	0,0526	2,2279	1,6213	lam.	0,0062

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0371	-0,0334	1,1493	0,000504	0,000222	0,000359	23,4	0,0294	2,2680	1,6151	lam.	0,0082
0,0585	-0,0401	1,1728	0,000719	0,000304	0,000486	35,0	0,0172	2,3662	1,6009	lam.	0,0108
0,0838	-0,0449	1,1621	0,001024	0,000410	0,000649	48,2	0,0104	2,4992	1,5835	lam.	0,0138
0,1125	-0,0481	1,1446	0,001410	0,000531	0,000831	61,8	0,0065	2,6576	1,5661	lam.	0,0175
0,1443	-0,0498	1,1108	0,001796	0,000652	0,001016	74,8	0,0047	2,7538	1,5573	lam.	0,0206
0,1790	-0,0506	1,0888	0,002574	0,000809	0,001239	90,1	0,0020	3,1804	1,5304	lam.	0,0316
0,2161	-0,0506	1,0622	0,002909	0,000935	0,001435	102,1	0,0020	3,1104	1,5337	lam.	0,0317
0,2555	-0,0503	1,0453	0,004217	0,001096	0,001660	116,6	0,0002	3,8486	1,5155	lam.	0,0905
0,2970	-0,0500	1,0423	0,004135	0,001213	0,001847	127,0	0,0009	3,4091	1,5228	lam.	0,0468
0,3446	-0,0495	1,0519	0,003610	0,001269	0,001967	132,6	0,0023	2,8456	1,5500	lam.	0,0293
0,3941	-0,0479	1,0420	0,003263	0,001288	0,002034	135,8	0,0035	2,5340	1,5794	lam.	0,0238
0,4449	-0,0454	1,0286	0,003875	0,001420	0,002214	148,3	0,0025	2,7298	1,5594	lam.	0,0285
0,4964	-0,0422	1,0124	0,004621	0,001562	0,002409	161,1	0,0016	2,9577	1,5421	lam.	0,0352
0,5480	-0,0386	0,9972	0,005970	0,001729	0,002630	175,4	0,0006	3,4539	1,5216	lam.	0,0577
0,5993	-0,0348	0,9851	0,003975	0,001886	0,002915	188,5	0,0019	2,1076	1,5457	turb.	0,0328
0,6496	-0,0308	0,9691	0,003823	0,002039	0,003242	201,3	0,0026	1,8754	1,5903	turb.	0,0278
0,6984	-0,0269	0,9572	0,003968	0,002247	0,003631	218,2	0,0030	1,7660	1,6159	turb.	0,0258
0,7452	-0,0231	0,9443	0,004104	0,002430	0,003977	233,2	0,0034	1,6887	1,6364	turb.	0,0244
0,7894	-0,0195	0,9323	0,004345	0,002640	0,004352	249,8	0,0035	1,6459	1,6486	turb.	0,0238
0,8305	-0,0161	0,9166	0,004607	0,002844	0,004711	265,8	0,0036	1,6199	1,6564	turb.	0,0235
0,8681	-0,0131	0,9067	0,005027	0,003104	0,005143	285,2	0,0036	1,6195	1,6565	turb.	0,0236
0,9017	-0,0103	0,8881	0,005305	0,003298	0,005475	299,7	0,0036	1,6084	1,6600	turb.	0,0236
0,9308	-0,0079	0,8701	0,005921	0,003616	0,005971	321,8	0,0034	1,6374	1,6510	turb.	0,0243
0,9552	-0,0059	0,8518	0,006615	0,003947	0,006472	344,1	0,0031	1,6760	1,6397	turb.	0,0253
0,9745	-0,0042	0,8194	0,007459	0,004308	0,006999	367,7	0,0028	1,7312	1,6246	turb.	0,0266
0,9884	-0,0030	0,7850	0,009603	0,005022	0,007942	412,0	0,0021	1,9122	1,5815	turb.	0,0310
0,9969	-0,0023	0,8174	0,013777	0,006001	0,009091	471,3	0,0011	2,2959	1,5150	turb.	0,0418
0,9997	-0,0021	0,7304	0,019549	0,005511	0,010021	403,5	0,0000	3,5471	1,8183	turb.	0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P.
-49,0	-0,597	0,82289	-0,057	0,977	0,008	0,982	0,054	-0,726	0,318	0,154
-48,0	-0,616	0,78947	-0,056	0,977	0,008	0,983	0,055	-0,780	0,315	0,159
-47,0	-0,636	0,76750	-0,055	0,975	0,008	0,984	0,056	-0,828	0,311	0,164
-46,0	-0,657	0,73557	-0,054	0,974	0,009	0,983	0,057	-0,893	0,310	0,168
-45,0	-0,679	0,69712	-0,052	0,972	0,009	0,985	0,057	-0,974	0,305	0,173
-44,0	-0,702	0,66940	-0,051	0,971	0,009	0,985	0,058	-1,048	0,296	0,177
-43,0	-0,726	0,64187	-0,050	0,969	0,009	0,985	0,059	-1,131	0,292	0,181
-42,0	-0,752	0,61709	-0,049	0,968	0,010	0,985	0,060	-1,218	0,285	0,185
-41,0	-0,778	0,59586	-0,048	0,967	0,009	0,985	0,062	-1,306	0,281	0,188
-40,0	-0,806	0,56242	-0,047	0,966	0,010	0,985	0,064	-1,434	0,281	0,191
-39,0	-0,835	0,54025	-0,046	0,964	0,010	0,984	0,065	-1,546	0,277	0,194
-38,0	-0,865	0,51179	-0,046	0,963	0,010	0,985	0,067	-1,691	0,273	0,197
-37,0	-0,896	0,48539	-0,045	0,962	0,010	0,984	0,069	-1,846	0,272	0,200
-36,0	-0,928	0,45968	-0,044	0,961	0,011	0,984	0,071	-2,018	0,268	0,202
-35,0	-0,960	0,43552	-0,044	0,959	0,011	0,985	0,073	-2,204	0,267	0,204
-34,0	-0,992	0,41372	-0,043	0,956	0,011	0,985	0,074	-2,399	0,264	0,206
-33,0	-1,025	0,38729	-0,043	0,953	0,011	0,986	0,077	-2,647	0,261	0,208
-32,0	-1,058	0,36285	-0,042	0,950	0,011	0,986	0,079	-2,915	0,261	0,210
-31,0	-1,089	0,34044	-0,042	0,947	0,011	0,987	0,081	-3,199	0,258	0,211
-30,0	-1,120	0,31974	-0,042	0,944	0,012	0,987	0,083	-3,501	0,257	0,213
-29,0	-1,141	0,29914	-0,042	0,941	0,012	0,987	0,085	-3,814	0,249	0,213
-28,0	-1,159	0,27801	-0,042	0,939	0,012	0,987	0,091	-4,170	0,240	0,214
-27,0	-1,175	0,25877	-0,042	0,935	0,013	0,988	0,094	-4,539	0,233	0,214
-26,0	-1,186	0,23877	-0,042	0,927	0,013	0,989	0,100	-4,968	0,213	0,214
-25,0	-1,194	0,22061	-0,043	0,920	0,014	0,990	0,105	-5,412	0,166	0,214
-24,0	-1,196	0,20506	-0,043	0,914	0,014	1,000	0,109	-5,834	55,530	0,214

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

-23,0	-1,194	0,18654	-0,044	0,907	0,014	1,000	0,116	-6,401	0,369	0,213
-22,0	-1,185	0,17152	-0,045	0,899	0,015	1,000	0,123	-6,910	0,319	0,212
-21,0	-1,170	0,15533	-0,046	0,890	0,016	1,000	0,132	-7,536	0,298	0,211
-20,0	-1,148	0,14134	-0,046	0,883	0,017	1,000	0,139	-8,120	0,289	0,210
-19,0	-1,118	0,12704	-0,048	0,876	0,018	1,000	0,151	-8,803	0,296	0,207
-18,0	-1,083	0,11202	-0,049	0,860	0,021	1,000	0,170	-9,669	0,298	0,204
-17,0	-1,040	0,09831	-0,051	0,845	0,022	1,000	0,194	-10,58	0,289	0,201
-16,0	-0,988	0,08697	-0,053	0,829	0,023	1,000	0,213	-11,36	0,291	0,196
-15,0	-0,932	0,07416	-0,056	0,811	0,024	1,000	0,250	-12,56	0,354	0,190
-14,0	-0,894	0,04938	-0,063	0,794	0,025	1,000	0,421	-18,09	0,377	0,180
-13,0	-0,836	0,03487	-0,068	0,775	0,026	1,000	0,559	-23,97	0,333	0,169
-12,0	-0,772	0,02383	-0,073	0,758	0,028	1,000	0,730	-32,40	0,313	0,155
-11,0	-0,689	0,01892	-0,077	0,727	0,031	1,000	0,860	-36,42	0,287	0,138
-10,0	-0,586	0,01697	-0,080	0,698	0,034	1,000	0,924	-34,55	0,275	0,114
-9,0	-0,474	0,01583	-0,082	0,674	0,039	1,000	0,959	-29,91	0,270	0,076
-8,0	-0,354	0,01515	-0,085	0,635	0,044	1,000	0,973	-23,39	0,268	0,011
-7,0	-0,232	0,01270	-0,087	0,593	0,049	1,000	0,981	-18,26	0,268	-0,124
-6,0	-0,107	0,01258	-0,089	0,570	0,057	1,000	0,988	-8,515	0,269	-0,583
-5,0	0,020	0,01426	-0,092	0,540	0,067	1,000	0,998	1,371	0,268	4,938
-4,0	0,147	0,01258	-0,094	0,494	0,079	0,989	0,999	11,722	0,268	0,887
-3,0	0,276	0,01242	-0,096	0,427	0,107	0,986	0,999	22,212	0,269	0,599
-2,0	0,404	0,01271	-0,099	0,375	0,124	0,983	1,000	31,777	0,270	0,495
-1,0	0,531	0,01517	-0,102	0,335	0,141	0,980	1,000	35,019	0,271	0,441
0,0	0,655	0,01417	-0,104	0,321	0,490	0,978	1,000	46,241	0,272	0,409
1,0	0,781	0,01445	-0,107	0,310	0,540	0,974	1,000	54,038	0,272	0,387
2,0	0,905	0,01467	-0,110	0,299	0,620	0,969	1,000	61,694	0,273	0,371
3,0	1,028	0,01503	-0,113	0,287	0,700	0,964	1,000	68,427	0,274	0,360
4,0	1,150	0,01549	-0,116	0,276	0,777	0,958	1,000	74,260	0,274	0,351
5,0	1,270	0,01609	-0,119	0,266	0,814	0,951	1,000	78,953	0,275	0,343
6,0	1,389	0,01670	-0,122	0,258	0,875	0,943	1,000	83,161	0,276	0,338
7,0	1,505	0,01749	-0,125	0,251	0,892	0,934	1,000	86,022	0,276	0,333
8,0	1,617	0,01840	-0,128	0,243	0,908	0,923	1,000	87,910	0,277	0,329
9,0	1,725	0,01976	-0,131	0,225	0,926	0,909	1,000	87,295	0,278	0,326
10,0	1,828	0,02122	-0,133	0,211	0,945	0,893	1,000	86,137	0,279	0,323
11,0	1,923	0,02289	-0,136	0,197	0,958	0,877	1,000	84,009	0,280	0,321
12,0	2,005	0,02586	-0,139	0,168	0,963	0,846	1,000	77,554	0,280	0,319
13,0	2,079	0,02953	-0,141	0,140	0,967	0,812	1,000	70,401	0,282	0,318
14,0	2,143	0,03423	-0,143	0,113	0,973	0,773	1,000	62,613	0,282	0,317
15,0	2,191	0,04082	-0,145	0,083	0,978	0,725	1,000	53,688	0,287	0,316
16,0	2,227	0,04828	-0,146	0,061	0,986	0,679	1,000	46,122	0,295	0,316
17,0	2,249	0,05822	-0,147	0,039	1,000	0,628	1,000	38,620	0,312	0,316
18,0	2,264	0,06869	-0,149	0,025	1,000	0,585	1,000	32,955	0,364	0,316
19,0	2,276	0,07772	-0,150	0,021	1,000	0,556	1,000	29,280	0,513	0,316
20,0	2,277	0,08768	-0,152	0,019	1,000	0,528	1,000	25,972	-0,299	0,317
21,0	2,269	0,09841	-0,154	0,017	1,000	0,501	1,000	23,062	0,116	0,318
22,0	2,253	0,11078	-0,155	0,014	1,000	0,475	1,000	20,342	0,172	0,319
23,0	2,230	0,12353	-0,157	0,013	1,000	0,450	1,000	18,050	0,195	0,320
24,0	2,196	0,13759	-0,158	0,011	1,000	0,429	1,000	15,963	0,214	0,322
25,0	2,144	0,15290	-0,160	0,009	1,000	0,408	1,000	14,023	0,222	0,325
26,0	2,087	0,16878	-0,161	0,008	1,000	0,390	1,000	12,365	0,224	0,327
27,0	2,025	0,18564	-0,163	0,007	1,000	0,372	1,000	10,906	0,227	0,330
28,0	1,958	0,20324	-0,164	0,007	1,000	0,356	1,000	9,636	0,229	0,334

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

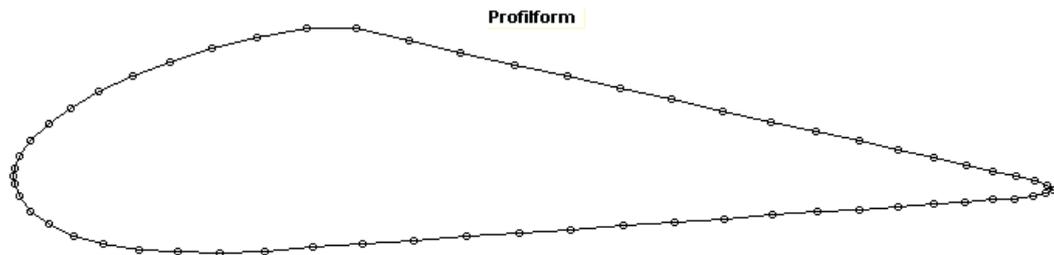
29,0	1,890	0,22099	-0,166	0,006	1,000	0,341	1,000	8,552	0,228	0,338
30,0	1,821	0,24022	-0,167	0,005	1,000	0,328	1,000	7,579	0,228	0,342
31,0	1,751	0,25937	-0,169	0,005	1,000	0,316	1,000	6,749	0,229	0,346
32,0	1,680	0,28026	-0,170	0,005	1,000	0,304	1,000	5,996	0,232	0,351
33,0	1,611	0,30326	-0,171	0,004	1,000	0,291	1,000	5,311	0,233	0,356
34,0	1,543	0,32566	-0,173	0,004	1,000	0,280	1,000	4,737	0,234	0,362
35,0	1,476	0,35016	-0,174	0,003	1,000	0,268	1,000	4,215	0,236	0,368
36,0	1,411	0,37492	-0,174	0,003	1,000	0,255	1,000	3,764	0,238	0,374
37,0	1,349	0,40223	-0,175	0,003	1,000	0,243	1,000	3,353	0,241	0,380
38,0	1,289	0,42988	-0,176	0,002	1,000	0,231	1,000	2,998	0,245	0,386
39,0	1,231	0,45918	-0,176	0,002	1,000	0,218	1,000	2,682	0,248	0,393
40,0	1,177	0,48970	-0,176	0,002	1,000	0,205	1,000	2,403	0,255	0,399
41,0	1,124	0,52531	-0,175	0,002	1,000	0,190	1,000	2,140	0,261	0,406
42,0	1,075	0,56017	-0,175	0,001	1,000	0,177	1,000	1,918	0,261	0,413
43,0	1,028	0,59736	-0,174	0,001	1,000	0,165	1,000	1,721	0,258	0,419
44,0	0,985	0,62847	-0,174	0,001	1,000	0,156	1,000	1,567	0,259	0,427
45,0	0,943	0,66410	-0,173	0,001	1,000	0,146	1,000	1,421	0,508	0,434
46,0	0,905	0,69827	-0,153	0,001	0,548	0,139	0,548	1,296	0,521	0,420
47,0	0,869	0,73209	-0,153	0,001	0,549	0,131	0,549	1,187	0,263	0,426
48,0	0,835	0,76859	-0,153	0,000	0,549	0,123	0,549	1,086	0,268	0,433
49,0	0,803	0,80597	-0,152	0,000	0,549	0,116	0,549	0,996	0,268	0,439
50,0	0,773	0,83916	-0,151	0,000	0,549	0,110	0,549	0,921	0,266	0,446

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Reihenuntersuchung

Asymmetrische Profile

(4) ERpLK 05 30 20



1,0000	0,0000
0,9941	0,0052
0,9823	0,0096
0,9647	0,0130
0,9427	0,0179
0,9163	0,0240
0,8857	0,0307
0,8513	0,0386
0,8133	0,0470
0,7721	0,0562
0,7280	0,0660
0,6817	0,0765
0,6334	0,0872
0,5837	0,0985
0,5330	0,1098
0,4817	0,1213
0,4305	0,1329
0,3798	0,1442
0,3303	0,1564
0,2811	0,1564
0,2345	0,1474
0,1907	0,1365
0,1504	0,1239
0,1141	0,1099
0,0821	0,0949
0,0548	0,0795
0,0331	0,0635
0,0163	0,0478
0,0054	0,0324
0,0008	0,0203
-0,0001	0,0128
0,0008	0,0054
0,0053	-0,0063
0,0157	-0,0203

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0331 -0,0333
0,0570 -0,0440
0,0863 -0,0519
0,1200 -0,0576
0,1577 -0,0602
0,1985 -0,0616
0,2421 -0,0593
0,2879 -0,0551
0,3357 -0,0520
0,3849 -0,0486
0,4352 -0,0452
0,4859 -0,0418
0,5366 -0,0382
0,5868 -0,0348
0,6360 -0,0312
0,6838 -0,0277
0,7297 -0,0244
0,7733 -0,0213
0,8141 -0,0188
0,8517 -0,0159
0,8858 -0,0134
0,9161 -0,0115
0,9422 -0,0094
0,9640 -0,0083
0,9811 -0,0064
0,9929 -0,0025
1,0000 0,0000

x/L	y/L	v/V
1,00000	0,00000	0,44267
0,99410	0,00520	1,09120
0,98230	0,00960	1,06768
0,96470	0,01300	0,95920
0,94270	0,01790	0,97513
0,91630	0,02400	1,00151
0,88570	0,03070	1,00268
0,85130	0,03860	1,03233
0,81330	0,04700	1,04305
0,77210	0,05620	1,06360
0,72800	0,06600	1,08022
0,68170	0,07650	1,11007
0,63340	0,08720	1,12778
0,58370	0,09850	1,16518
0,53300	0,10980	1,19626
0,48170	0,12130	1,24017
0,43050	0,13290	1,30649
0,37980	0,14420	1,41918
0,33030	0,15341	1,59779

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,28110	0,15640	1,77211
0,23450	0,14740	1,52490
0,19070	0,13650	1,46575
0,15040	0,12390	1,41074
0,11410	0,10990	1,35205
0,08210	0,09490	1,28403
0,05480	0,07950	1,22718
0,03310	0,06350	1,09444
0,01630	0,04780	0,96122
0,00540	0,03240	0,70518
0,00080	0,02030	0,38537
-0,00010	0,01280	0,11454
0,00080	0,00540	0,17144
0,00530	-0,00630	0,54610
0,01570	-0,02030	0,91170
0,03310	-0,03330	1,12075
0,05700	-0,04400	1,20823
0,08630	-0,05190	1,21864
0,12000	-0,05760	1,23884
0,15770	-0,06020	1,18553
0,19850	-0,06160	1,20964
0,24210	-0,05930	1,13829
0,28790	-0,05510	1,05346
0,33570	-0,05200	1,05137
0,38490	-0,04860	1,03164
0,43520	-0,04520	1,01977
0,48590	-0,04180	1,01209
0,53660	-0,03820	0,99751
0,58680	-0,03480	0,99432
0,63600	-0,03120	0,98143
0,68380	-0,02770	0,97107
0,72970	-0,02440	0,96257
0,77330	-0,02130	0,94971
0,81410	-0,01880	0,95932
0,85170	-0,01590	0,93744
0,88580	-0,01340	0,92429
0,91610	-0,01150	0,93392
0,94220	-0,00940	0,89947
0,96400	-0,00830	0,94999
0,98110	-0,00640	0,97882
0,99290	-0,00250	0,79126
1,00000	0,00000	0,44267

x/l	y/l	v/V	δ_1	δ_2	δ_3	Re δ_2	C_f	H_12	H_32	Zust.	y1
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
1,0000	0,0000	0,4427	0,003087	0,005029	0,001600	222,7	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,9941	0,0052	1,0912	0,003087	0,005029	0,001600	548,9	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,9823	0,0096	1,0677	0,003087	0,005029	0,001600	537,1	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,9647	0,0130	0,9592	0,003087	0,005029	0,001600	482,5	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,9427	0,0179	0,9751	0,003087	0,005029	0,001600	490,5	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,9163	0,0240	1,0015	0,003087	0,005029	0,001600	503,8	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,8857	0,0307	1,0027	0,003087	0,005029	0,001600	504,4	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,8513	0,0386	1,0323	0,003087	0,005029	0,001600	519,3	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,8133	0,0470	1,0430	0,003087	0,005029	0,001600	524,7	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,7721	0,0562	1,0636	0,003087	0,005029	0,001600	535,0	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,7280	0,0660	1,0802	0,003087	0,005029	0,001600	543,4	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,6817	0,0765	1,1101	0,003087	0,005029	0,001600	558,4	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,6334	0,0872	1,1278	0,003087	0,005029	0,001600	567,3	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,5837	0,0985	1,1652	0,003087	0,005029	0,001600	586,1	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,5330	0,1098	1,1963	0,003087	0,005029	0,001600	601,7	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,4817	0,1213	1,2402	0,003087	0,005029	0,001600	623,8	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,4305	0,1329	1,3065	0,003087	0,005029	0,001600	657,2	0,0000	0,6137	0,3181	abgel.	0,0000
0,3798	0,1442	1,4192	0,003087	0,005029	0,001600	713,9	0,0000	0,6137	0,3181	turb.	0,0000
0,3303	0,1534	1,5978	0,001080	0,000518	0,000854	92,3	0,0095	2,0830	1,6474	lam.	0,0145
0,2811	0,1564	1,7721	0,001520	0,000651	0,001044	99,4	0,0063	2,3365	1,6050	lam.	0,0178
0,2345	0,1474	1,5249	0,001447	0,000613	0,000982	90,0	0,0067	2,3613	1,6015	lam.	0,0173
0,1907	0,1365	1,4657	0,001332	0,000563	0,000901	79,5	0,0076	2,3661	1,6009	lam.	0,0163
0,1504	0,1239	1,4107	0,001196	0,000507	0,000812	68,7	0,0088	2,3605	1,6017	lam.	0,0151
0,1141	0,1099	1,3521	0,001083	0,000449	0,000716	57,6	0,0098	2,4134	1,5945	lam.	0,0143
0,0821	0,0949	1,2840	0,000836	0,000363	0,000585	44,9	0,0146	2,3018	1,6101	lam.	0,0117
0,0548	0,0795	1,2272	0,000741	0,000319	0,000512	35,2	0,0181	2,3253	1,6068	lam.	0,0105
0,0331	0,0635	1,0944	0,000535	0,000236	0,000382	22,7	0,0304	2,2636	1,6158	lam.	0,0081
0,0163	0,0478	0,9612	0,000410	0,000183	0,000297	13,1	0,0545	2,2394	1,6195	lam.	0,0061
0,0054	0,0324	0,7052	0,000341	0,000152	0,000247	5,9	0,1212	2,2384	1,6197	lam.	0,0041
0,0008	0,0203	0,3854	0,000194	0,000087	0,000141	1,5	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,0144
-0,0001	0,0128	0,1146	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0008	0,0054	0,1714	0,000223	0,000100	0,000162	1,3	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,0144
0,0053	-0,0063	0,5461	0,000684	0,000299	0,000481	5,1	0,1297	2,2903	1,6117	lam.	0,0039
0,0157	-0,0203	0,9117	0,000376	0,000168	0,000273	9,2	0,0776	2,2333	1,6205	lam.	0,0051
0,0331	-0,0333	1,1207	0,000444	0,000198	0,000321	18,4	0,0388	2,2412	1,6193	lam.	0,0072
0,0570	-0,0440	1,2082	0,000611	0,000267	0,000430	30,3	0,0221	2,2901	1,6119	lam.	0,0095
0,0863	-0,0519	1,2186	0,000854	0,000357	0,000571	43,2	0,0136	2,3889	1,5979	lam.	0,0121
0,1200	-0,0576	1,2388	0,001245	0,000489	0,000772	59,6	0,0079	2,5456	1,5779	lam.	0,0159
0,1577	-0,0602	1,1855	0,001439	0,000578	0,000916	71,7	0,0071	2,4904	1,5847	lam.	0,0168
0,1985	-0,0616	1,2096	0,002786	0,000794	0,001206	94,0	0,0010	3,5099	1,5194	lam.	0,0450
0,2421	-0,0593	1,1383	0,001986	0,000805	0,001279	97,5	0,0054	2,4660	1,5880	lam.	0,0193
0,2879	-0,0551	1,0535	0,004388	0,003006	0,002297	316,7	0,0000	1,4597	0,7641	turb.	0,0000
0,3357	-0,0520	1,0514	0,004388	0,003006	0,002297	316,1	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,3849	-0,0486	1,0316	0,004388	0,003006	0,002297	310,2	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,4352	-0,0452	1,0198	0,004388	0,003006	0,002297	306,6	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,4859	-0,0418	1,0121	0,004388	0,003006	0,002297	304,3	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,5366	-0,0382	0,9975	0,004388	0,003006	0,002297	299,9	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,5868	-0,0348	0,9943	0,004388	0,003006	0,002297	298,9	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,6360	-0,0312	0,9814	0,004388	0,003006	0,002297	295,1	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,6838	-0,0277	0,9711	0,004388	0,003006	0,002297	291,9	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,7297	-0,0244	0,9626	0,004388	0,003006	0,002297	289,4	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,7733	-0,0213	0,9497	0,004388	0,003006	0,002297	285,5	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,8141	-0,0188	0,9593	0,004388	0,003006	0,002297	288,4	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,8517	-0,0159	0,9374	0,004388	0,003006	0,002297	281,8	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,8858	-0,0134	0,9243	0,004388	0,003006	0,002297	277,9	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,9161	-0,0115	0,9339	0,004388	0,003006	0,002297	280,8	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,9422	-0,0094	0,8995	0,004388	0,003006	0,002297	270,4	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,9640	-0,0083	0,9500	0,004388	0,003006	0,002297	285,6	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,9811	-0,0064	0,9788	0,004388	0,003006	0,002297	294,3	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
0,9929	-0,0025	0,7913	0,004388	0,003006	0,002297	237,9	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000
1,0000	0,0000	0,4427	0,004388	0,003006	0,002297	133,1	0,0000	1,4597	0,7641	abgel.	0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P. [-]
-49,0	-0,609	0,86613	-0,047	1,000	0,004	1,000	0,070	-0,703	0,308	0,174
-48,0	-0,632	0,83176	-0,045	1,000	0,005	1,000	0,072	-0,760	0,306	0,179
-47,0	-0,657	0,77009	-0,044	1,000	0,005	1,000	0,073	-0,853	0,298	0,183
-46,0	-0,684	0,75935	-0,043	1,000	0,005	1,000	0,076	-0,900	0,297	0,188
-45,0	-0,711	0,70279	-0,041	1,000	0,005	1,000	0,076	-1,012	0,294	0,192
-44,0	-0,741	0,68414	-0,040	1,000	0,006	1,000	0,079	-1,084	0,290	0,196
-43,0	-0,772	0,64645	-0,039	1,000	0,006	1,000	0,079	-1,195	0,287	0,200

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

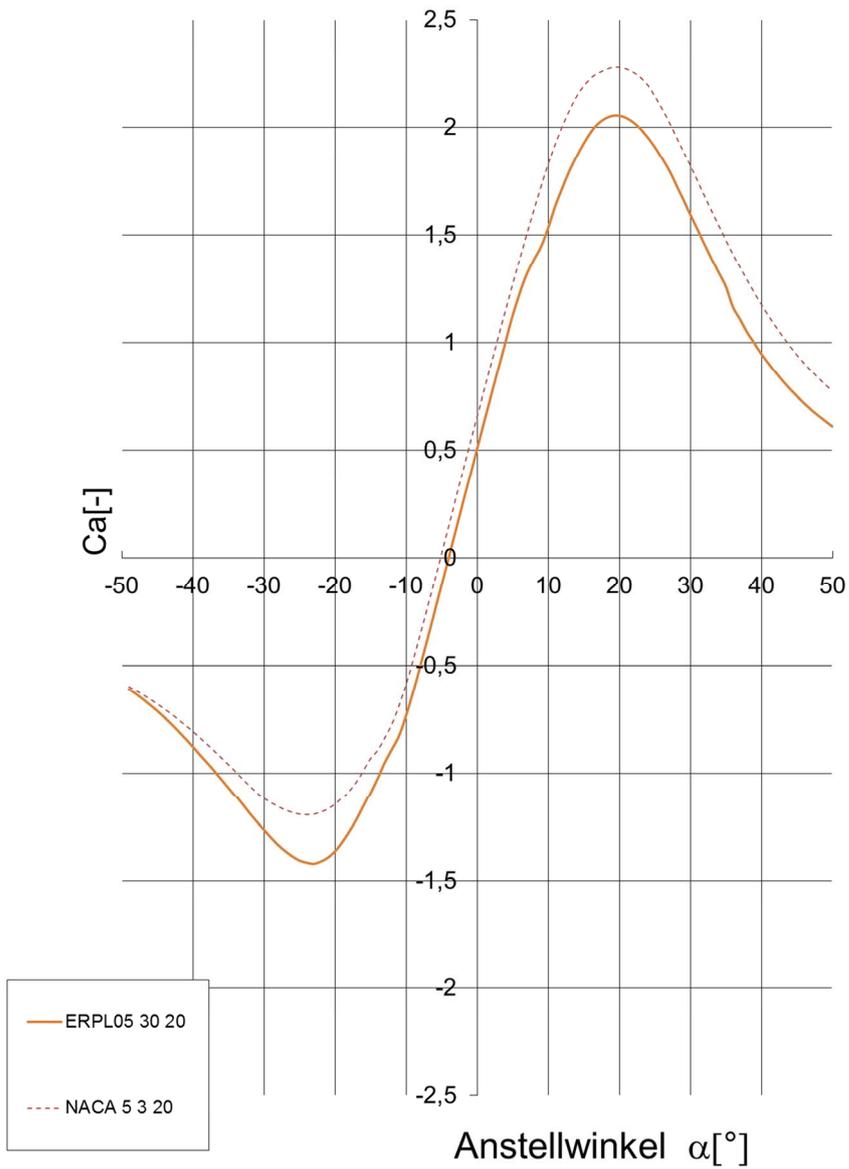
-42,0	-0,806	0,60337	-0,038	1,000	0,007	1,000	0,082	-1,335	0,279	0,203
-41,0	-0,841	0,59029	-0,037	1,000	0,008	1,000	0,085	-1,424	0,279	0,206
-40,0	-0,877	0,56445	-0,036	1,000	0,008	1,000	0,086	-1,554	0,280	0,209
-39,0	-0,915	0,53690	-0,035	1,000	0,009	1,000	0,086	-1,704	0,279	0,212
-38,0	-0,951	0,49930	-0,034	1,000	0,010	1,000	0,088	-1,904	0,274	0,215
-37,0	-0,988	0,47726	-0,033	1,000	0,010	1,000	0,091	-2,070	0,269	0,217
-36,0	-1,027	0,44629	-0,032	1,000	0,011	1,000	0,095	-2,301	0,263	0,219
-35,0	-1,067	0,40986	-0,032	1,000	0,013	1,000	0,103	-2,604	0,262	0,220
-34,0	-1,107	0,38767	-0,031	1,000	0,014	1,000	0,108	-2,857	0,264	0,222
-33,0	-1,148	0,35924	-0,031	1,000	0,015	1,000	0,112	-3,195	0,259	0,223
-32,0	-1,190	0,33235	-0,030	1,000	0,017	1,000	0,123	-3,580	0,258	0,224
-31,0	-1,229	0,30810	-0,030	1,000	0,018	1,000	0,128	-3,989	0,263	0,226
-30,0	-1,266	0,29301	-0,029	1,000	0,017	1,000	0,129	-4,321	0,262	0,227
-29,0	-1,302	0,27076	-0,029	1,000	0,018	1,000	0,134	-4,808	0,256	0,228
-28,0	-1,336	0,24819	-0,029	1,000	0,019	1,000	0,143	-5,382	0,254	0,228
-27,0	-1,364	0,23397	-0,029	1,000	0,018	1,000	0,147	-5,831	0,256	0,229
-26,0	-1,388	0,21409	-0,029	1,000	0,019	1,000	0,152	-6,483	0,251	0,229
-25,0	-1,407	0,19683	-0,029	1,000	0,021	1,000	0,159	-7,147	0,235	0,229
-24,0	-1,417	0,17957	-0,029	1,000	0,021	1,000	0,174	-7,892	0,163	0,229
-23,0	-1,422	0,15677	-0,030	1,000	0,022	1,000	0,206	-9,070	0,523	0,229
-22,0	-1,412	0,14182	-0,031	1,000	0,023	1,000	0,218	-9,959	0,278	0,228
-21,0	-1,394	0,12881	-0,031	1,000	0,023	1,000	0,229	-10,823	0,267	0,228
-20,0	-1,365	0,11669	-0,031	1,000	0,023	1,000	0,236	-11,699	0,264	0,227
-19,0	-1,324	0,10474	-0,032	1,000	0,024	1,000	0,247	-12,637	0,264	0,226
-18,0	-1,275	0,09359	-0,033	1,000	0,026	1,000	0,257	-13,619	0,265	0,224
-17,0	-1,220	0,08432	-0,033	0,370	0,029	1,000	0,273	-14,464	0,264	0,223
-16,0	-1,156	0,07512	-0,034	0,361	0,032	1,000	0,283	-15,390	0,268	0,220
-15,0	-1,092	0,06381	-0,036	0,354	0,036	1,000	0,319	-17,111	0,275	0,217
-14,0	-1,024	0,05290	-0,038	0,347	0,037	1,000	0,370	-19,353	0,279	0,213
-13,0	-0,951	0,04259	-0,040	0,343	0,040	1,000	0,435	-22,334	0,293	0,208
-12,0	-0,889	0,02847	-0,043	0,338	0,044	1,000	0,596	-31,226	0,313	0,201
-11,0	-0,827	0,01812	-0,048	0,335	0,049	1,000	0,826	-45,649	0,294	0,192
-10,0	-0,733	0,01534	-0,050	0,329	0,054	1,000	0,938	-47,777	0,273	0,181
-9,0	-0,622	0,01270	-0,052	0,322	0,061	1,000	0,988	-49,006	0,266	0,166
-8,0	-0,501	0,01219	-0,054	0,318	0,067	1,000	0,990	-41,094	0,264	0,142
-7,0	-0,378	0,01189	-0,056	0,314	0,073	1,000	0,992	-31,752	0,264	0,103
-6,0	-0,252	0,01147	-0,057	0,313	0,083	1,000	0,993	-22,002	0,265	0,022
-5,0	-0,126	0,01031	-0,059	0,311	0,129	1,000	0,994	-12,225	0,266	-0,221
-4,0	0,001	0,01034	-0,061	0,310	0,134	1,000	0,994	0,103	0,266	57,865
-3,0	0,128	0,01036	-0,064	0,308	0,137	1,000	0,995	12,375	0,267	0,746
-2,0	0,255	0,01047	-0,066	0,306	0,144	1,000	0,994	24,349	0,268	0,508
-1,0	0,381	0,01059	-0,068	0,307	0,150	1,000	0,995	35,986	0,268	0,428
0,0	0,507	0,01046	-0,070	0,307	0,224	1,000	0,995	48,509	0,269	0,389
1,0	0,633	0,01059	-0,073	0,305	0,228	1,000	0,995	59,738	0,270	0,365
2,0	0,757	0,01076	-0,075	0,306	0,233	1,000	0,995	70,353	0,271	0,350
3,0	0,881	0,01096	-0,078	0,305	0,239	1,000	0,995	80,405	0,271	0,339
4,0	1,004	0,01160	-0,081	0,303	0,247	1,000	0,995	86,568	0,272	0,330
5,0	1,126	0,01210	-0,083	0,303	0,251	1,000	0,996	93,073	0,270	0,324
6,0	1,230	0,01105	-0,085	0,305	0,257	0,935	0,995	111,306	0,262	0,319
7,0	1,318	0,01298	-0,086	0,305	0,267	0,825	0,995	101,589	0,249	0,315
8,0	1,386	0,01695	-0,085	0,305	0,277	0,667	0,995	81,758	0,231	0,311
9,0	1,447	0,02276	-0,083	0,305	0,942	0,518	0,993	63,587	0,244	0,308
10,0	1,533	0,02764	-0,084	0,305	0,987	0,464	0,989	55,481	0,268	0,305
11,0	1,635	0,04081	-0,087	0,083	0,987	0,464	0,989	40,077	0,276	0,303
12,0	1,719	0,04870	-0,089	0,032	0,986	0,450	0,988	35,299	0,279	0,302
13,0	1,797	0,05376	-0,091	0,029	0,986	0,445	0,987	33,419	0,284	0,301
14,0	1,865	0,05942	-0,094	0,025	0,986	0,438	0,988	31,387	0,288	0,300
15,0	1,926	0,06578	-0,096	0,022	0,986	0,432	0,988	29,276	0,295	0,300
16,0	1,978	0,07188	-0,099	0,020	0,986	0,428	0,988	27,522	0,308	0,300
17,0	2,016	0,07867	-0,101	0,019	0,986	0,425	0,988	25,627	0,335	0,300
18,0	2,040	0,08596	-0,104	0,016	0,986	0,422	0,988	23,737	0,395	0,301
19,0	2,053	0,09436	-0,107	0,014	0,986	0,419	0,988	21,754	0,654	0,302
20,0	2,054	0,10300	-0,109	0,013	0,987	0,416	0,989	19,938	-0,278	0,303
21,0	2,043	0,11158	-0,112	0,011	0,987	0,411	0,989	18,309	0,089	0,305
22,0	2,022	0,12030	-0,115	0,010	0,986	0,407	0,988	16,807	0,147	0,307
23,0	1,992	0,13183	-0,117	0,009	0,987	0,404	0,989	15,112	0,173	0,309
24,0	1,954	0,14265	-0,120	0,008	0,987	0,399	0,989	13,698	0,189	0,311
25,0	1,909	0,15330	-0,122	0,008	0,987	0,395	0,989	12,453	0,202	0,314

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

26,0	1,856	0,16668	-0,125	0,007	0,987	0,386	0,989	11,138	0,207	0,317
27,0	1,800	0,18152	-0,127	0,006	0,987	0,381	0,989	9,914	0,210	0,321
28,0	1,733	0,19539	-0,129	0,005	0,987	0,377	0,989	8,871	0,215	0,325
29,0	1,665	0,20737	-0,132	0,005	0,986	0,371	0,987	8,027	0,218	0,329
30,0	1,594	0,22703	-0,134	0,004	0,986	0,363	0,988	7,023	0,218	0,334
31,0	1,526	0,24191	-0,136	0,004	0,986	0,359	0,987	6,306	0,218	0,339
32,0	1,457	0,25871	-0,138	0,004	0,986	0,353	0,987	5,631	0,220	0,345
33,0	1,389	0,27808	-0,140	0,004	0,985	0,345	0,987	4,996	0,221	0,351
34,0	1,324	0,30124	-0,142	0,004	0,985	0,338	0,987	4,395	0,227	0,357
35,0	1,259	0,32210	-0,143	0,003	0,985	0,323	0,987	3,908	0,314	0,364
36,0	1,165	0,40595	-0,132	0,003	0,987	0,197	0,989	2,871	0,323	0,363
37,0	1,108	0,43246	-0,132	0,003	0,985	0,184	0,987	2,562	0,283	0,369
38,0	1,047	0,48164	-0,128	0,003	0,985	0,145	0,987	2,173	0,272	0,372
39,0	0,998	0,49998	-0,130	0,003	0,985	0,143	0,987	1,996	0,250	0,380
40,0	0,948	0,54343	-0,128	0,003	0,985	0,125	0,987	1,745	0,261	0,385
41,0	0,904	0,56938	-0,129	0,003	0,985	0,120	0,987	1,588	0,260	0,392
42,0	0,861	0,61450	-0,127	0,002	0,985	0,106	0,987	1,401	0,273	0,398
43,0	0,821	0,64946	-0,127	0,002	0,986	0,097	0,988	1,265	0,260	0,404
44,0	0,784	0,67907	-0,126	0,002	0,986	0,090	0,988	1,155	0,256	0,411
45,0	0,750	0,71580	-0,126	0,002	0,986	0,085	0,988	1,048	0,469	0,418
46,0	0,718	0,73730	-0,112	0,002	0,537	0,081	0,537	0,974	0,475	0,406
47,0	0,688	0,76375	-0,112	0,002	0,537	0,078	0,538	0,901	0,227	0,413
48,0	0,661	0,81907	-0,113	0,002	0,538	0,077	0,540	0,807	0,229	0,421
49,0	0,635	0,84405	-0,114	0,002	0,538	0,074	0,540	0,752	0,241	0,429
50,0	0,610	0,86848	-0,114	0,002	0,537	0,072	0,538	0,702	0,244	0,436

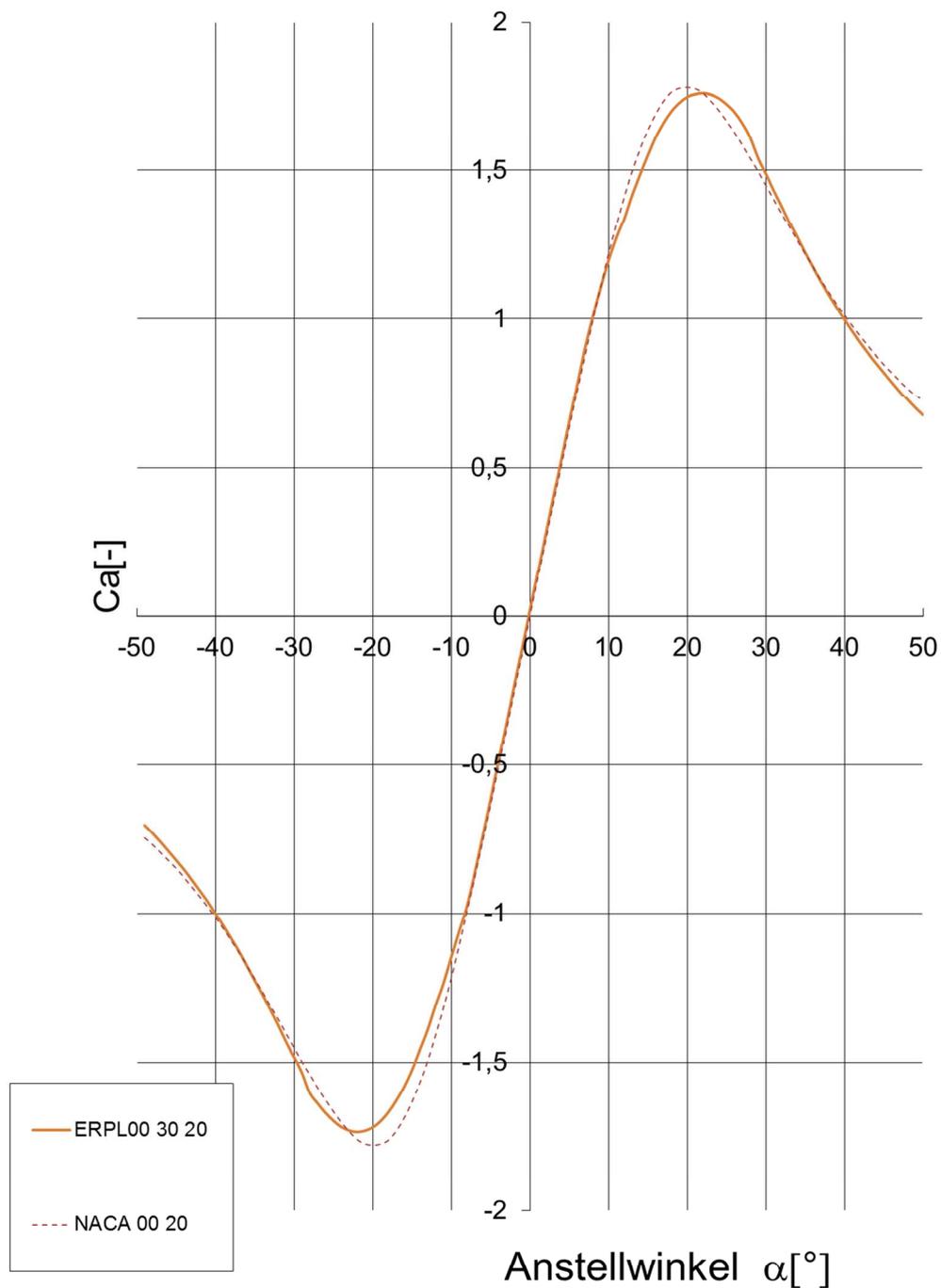
PROFILE NACA 5 3 20 und ERpL 05 30 20

Auftriebsbeiwert C_A
Medium: Luft, $Re: 10^6$

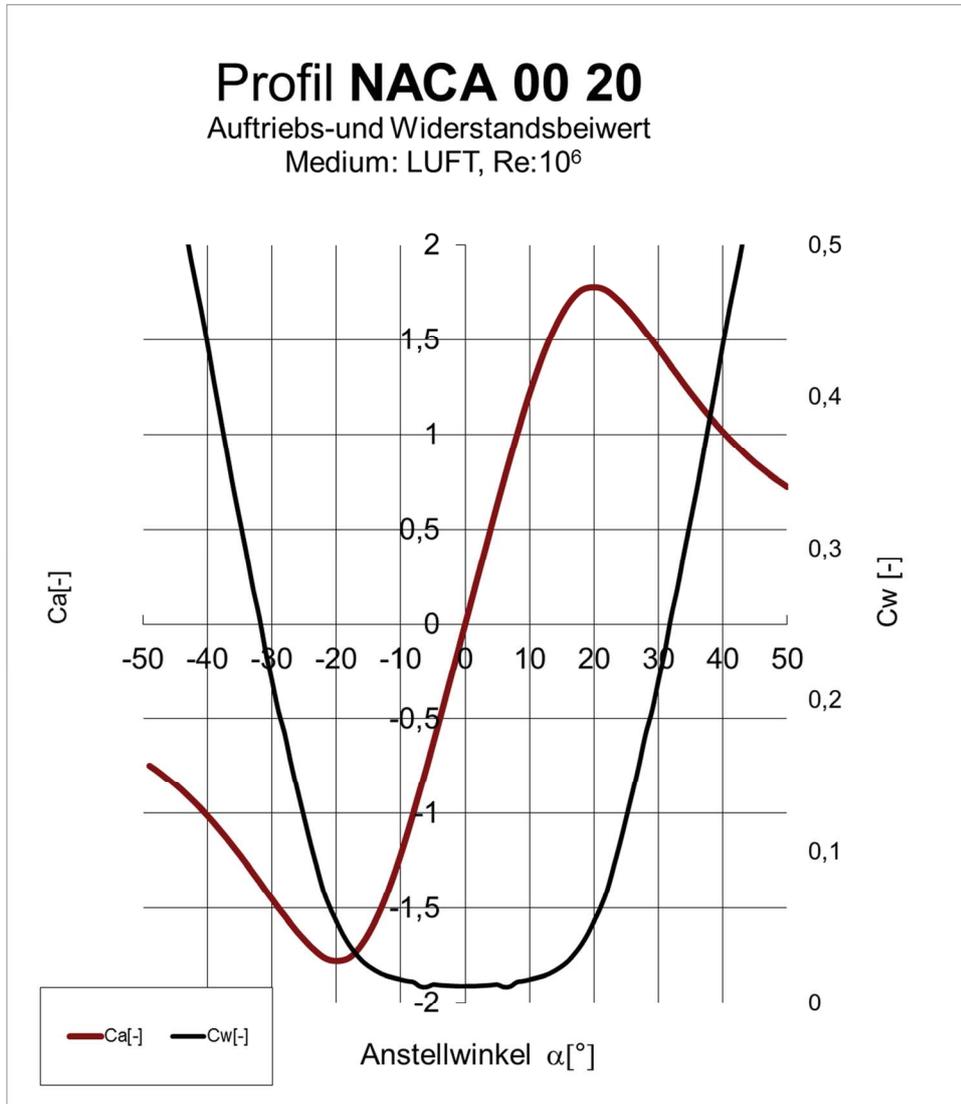


PROFILE NACA 00 20 und ERpL 00 30 20

Auftriebsbeiwert C_A
Medium: Luft, $Re: 10^6$



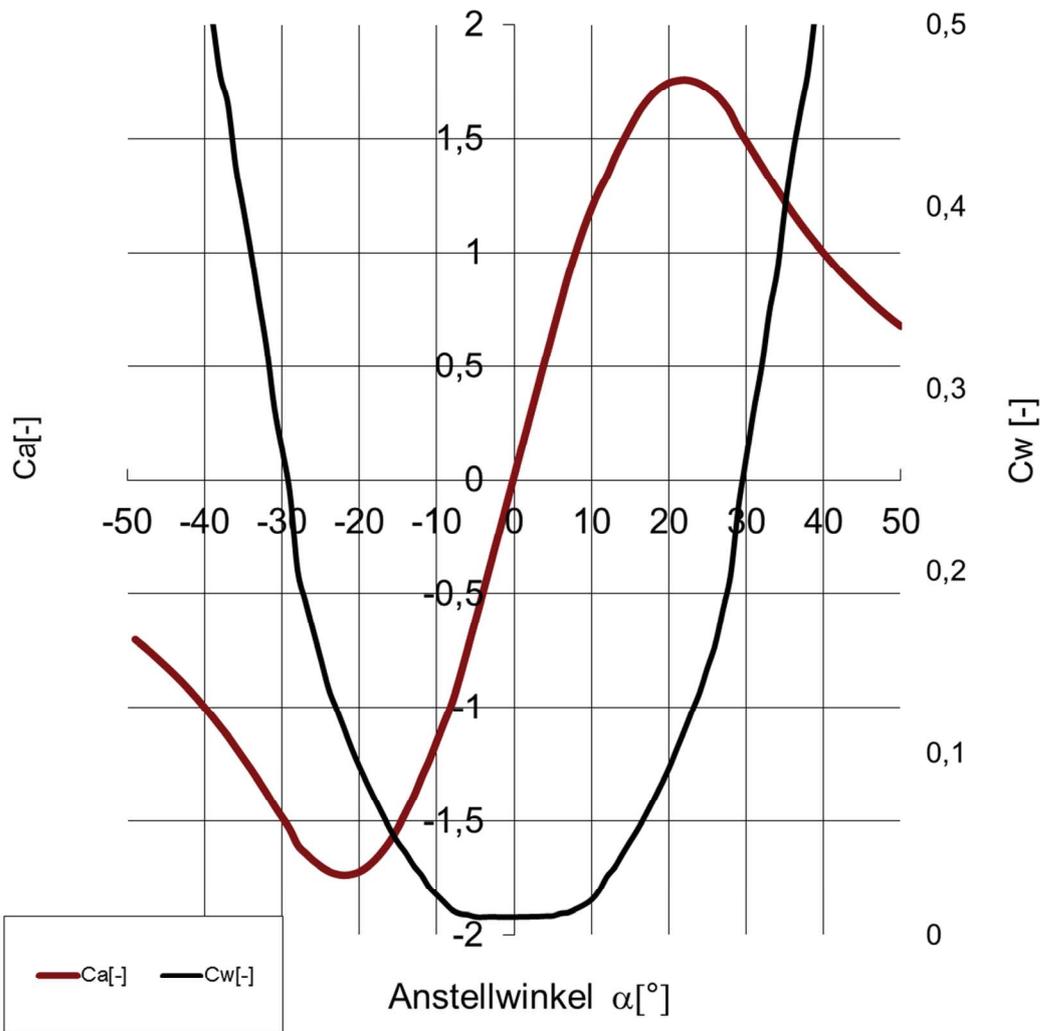
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

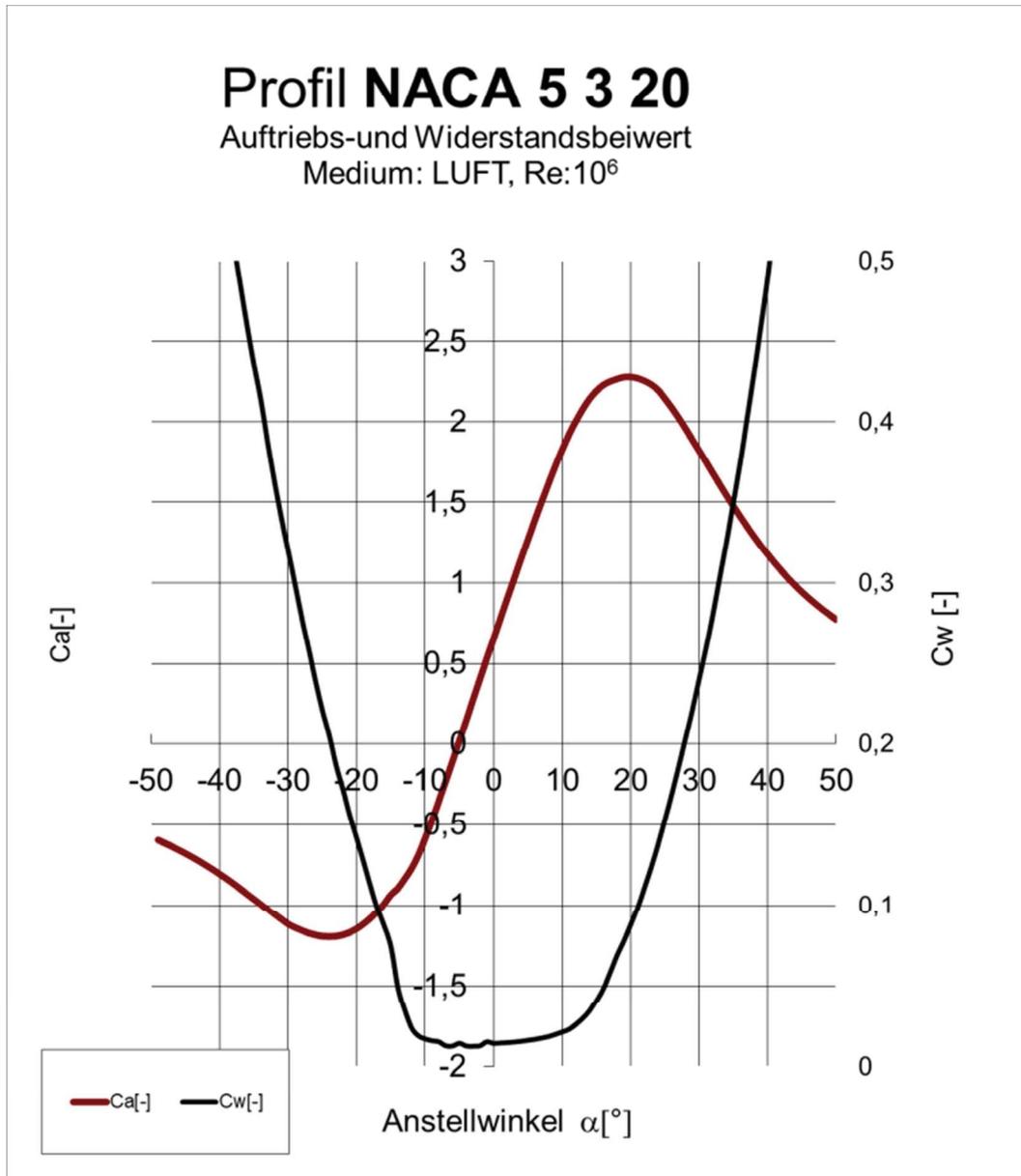


Profil ERpL K 00 30 20

Auftriebs- und Widerstandsbeiwert

Medium: LUFT, $Re: 10^6$

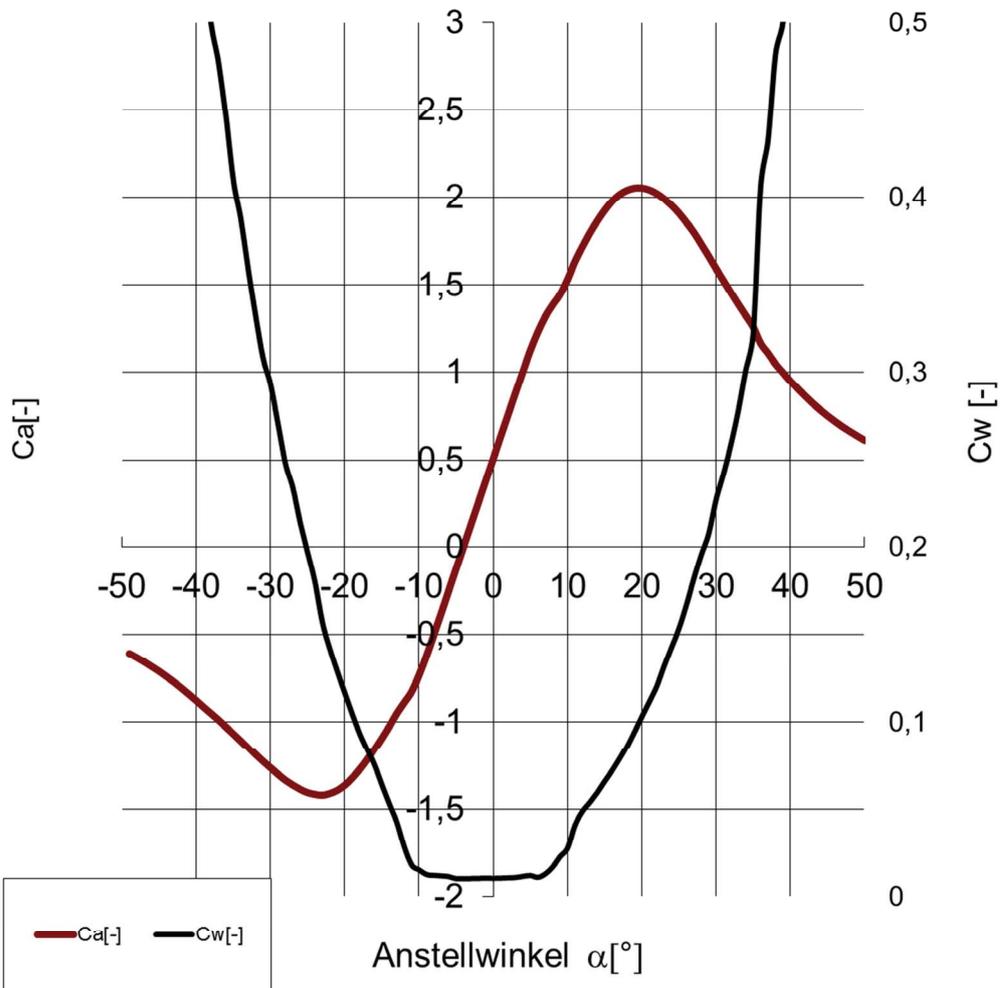




Profil ERpL 05 30 20

Auftriebs- und Widerstandsbeiwert

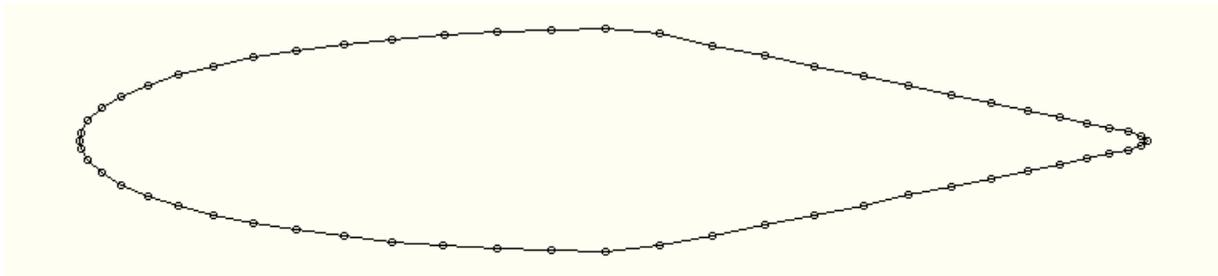
Medium: LUFT, $Re: 10^6$



Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

Symmetrische Profile (CARPO)

(8) ERpLK 00 50 20 LUFT RE 10E6



```
1,0000 0,0000  
0,9943 0,0050  
0,9825 0,0091  
0,9655 0,0125  
0,9440 0,0170  
0,9182 0,0223  
0,8882 0,0285  
0,8545 0,0356  
0,8173 0,0434  
0,7770 0,0518  
0,7340 0,0607  
0,6886 0,0702  
0,6414 0,0801  
0,5927 0,0900  
0,5432 0,1006  
0,4923 0,1053  
0,4412 0,1040  
0,3905 0,1024  
0,3409 0,0998  
0,2928 0,0957  
0,2468 0,0909  
0,2032 0,0852  
0,1626 0,0784  
0,1254 0,0706  
0,0920 0,0621  
0,0629 0,0527  
0,0386 0,0424  
0,0198 0,0311  
0,0073 0,0191  
0,0012 0,0077  
-0,000 0,0003  
0,0012 -0,0072  
0,0072 -0,0184  
0,0199 -0,0302  
0,0388 -0,0413
```

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0630-0,0518
0,0921-0,0612
0,1254-0,0696
0,1626-0,0774
0,2032-0,0842
0,2467-0,0899
0,2928-0,0947
0,3408-0,0986
0,3904-0,1012
0,4410-0,1026
0,4921-0,1040
0,5428-0,0985
0,5927-0,0898
0,6414-0,0797
0,6886-0,0698
0,7339-0,0604
0,7769-0,0514
0,8172-0,0430
0,8543-0,0352
0,8881-0,0283
0,9179-0,0220
0,9438-0,0166
0,9653-0,0122
0,9823-0,0089
0,9939-0,0046
1,0000 0,0000

X/t	y/t	v/V
1,00000	0,00000	0,38265
0,99430	0,00500	1,15313
0,98250	0,00760	0,87560
0,96550	0,01250	0,99061
0,94400	0,01700	0,96561
0,91820	0,02230	0,97552
0,88820	0,02850	0,98976
0,85450	0,03560	1,01242
0,81730	0,04340	1,03406
0,77700	0,05180	1,05728
0,73400	0,06070	1,08076
0,68860	0,07020	1,11416
0,64140	0,08010	1,16013
0,59270	0,09000	1,24037
0,54320	0,09761	1,28982
0,49230	0,10231	1,31021
0,44120	0,10400	1,31711
0,39050	0,10240	1,26860
0,34090	0,09980	1,26518
0,29280	0,09570	1,24237
0,24680	0,09090	1,23945
0,20320	0,08520	1,23956

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,16260	0,07840	1,23221
0,12540	0,07060	1,21800
0,09200	0,06210	1,21246
0,06290	0,05270	1,19534
0,03860	0,04240	1,16341
0,01980	0,03110	1,07629
0,00730	0,01910	0,85435
0,00120	0,00770	0,46262
-0,00000	0,00030	0,09000
0,00120	-0,00720	0,29853
0,00720	-0,01840	0,72046
0,01990	-0,03020	0,95810
0,03880	-0,04130	1,05434
0,06300	-0,05180	1,12170
0,09210	-0,06120	1,14684
0,12540	-0,06960	1,15641
0,16260	-0,07740	1,17703
0,20320	-0,08420	1,18833
0,24670	-0,08990	1,19217
0,29280	-0,09470	1,19927
0,34080	-0,09860	1,21503
0,39040	-0,10120	1,22373
0,44100	-0,10260	1,24150
0,49210	-0,10250	1,30849
0,54280	-0,09700	1,22901
0,59270	-0,08980	1,20952
0,64140	-0,07970	1,11694
0,68860	-0,06980	1,07226
0,73390	-0,06040	1,04189
0,77690	-0,05140	1,01176
0,81720	-0,04300	0,98743
0,85430	-0,03520	0,95846
0,88810	-0,02830	0,94379
0,91790	-0,02200	0,91451
0,94380	-0,01660	0,92044
0,96530	-0,01070	0,80095
0,98230	-0,00740	0,90583
0,99390	-0,00161	0,56245
1,00000	0,00000	0,38265

x/l	y/l	v/V	δ_1	δ_2	δ_3	Re δ_2	C _f	H ₁₂	H ₃₂	Zust.	y1
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
1,0000	0,0000	0,3826	0,006110	0,003619	0,003192	138,5	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,9943	0,0050	1,1531	0,006110	0,003619	0,003192	417,3	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,9825	0,0076	0,8756	0,006110	0,003619	0,003192	316,9	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,9655	0,0125	0,9906	0,006110	0,003619	0,003192	358,5	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,9440	0,0170	0,9656	0,006110	0,003619	0,003192	349,4	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,9182	0,0223	0,9755	0,006110	0,003619	0,003192	353,0	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,8882	0,0285	0,9898	0,006110	0,003619	0,003192	358,2	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,8545	0,0356	1,0124	0,006110	0,003619	0,003192	366,4	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,8173	0,0434	1,0341	0,006110	0,003619	0,003192	374,2	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,7770	0,0518	1,0573	0,006110	0,003619	0,003192	382,6	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,7340	0,0607	1,0808	0,006110	0,003619	0,003192	391,1	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,6886	0,0702	1,1142	0,006110	0,003619	0,003192	403,2	0,0000	1,6884	0,8819	abgel.	0,0000
0,6414	0,0801	1,1601	0,006110	0,003619	0,003192	419,8	0,0000	1,6884	0,8819	turb.	0,0000
0,5927	0,0900	1,2404	0,003733	0,001309	0,002027	168,8	0,0018	2,8528	1,5490	lam.	0,0333
0,5432	0,0976	1,2898	0,002926	0,001160	0,001834	152,0	0,0032	2,5212	1,5805	lam.	0,0250

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,4923	0,1023	1,3102	0,002311	0,001033	0,001674	136,2	0,0052	2,2374	1,6200	lam.	0,0196
0,4412	0,1040	1,3171	0,002719	0,001086	0,001719	137,8	0,0036	2,5032	1,5829	lam.	0,0235
0,3905	0,1024	1,2686	0,002400	0,001000	0,001596	126,6	0,0045	2,4000	1,5963	lam.	0,0210
0,3409	0,0998	1,2652	0,002499	0,000976	0,001538	121,2	0,0038	2,5612	1,5761	lam.	0,0230
0,2928	0,0957	1,2424	0,002308	0,000895	0,001409	110,9	0,0040	2,5787	1,5740	lam.	0,0222
0,2468	0,0909	1,2395	0,002016	0,000798	0,001262	99,0	0,0049	2,5249	1,5804	lam.	0,0202
0,2032	0,0852	1,2396	0,001775	0,000711	0,001126	87,6	0,0057	2,4969	1,5838	lam.	0,0187
0,1626	0,0784	1,2322	0,001626	0,000637	0,001004	77,6	0,0060	2,5525	1,5771	lam.	0,0182
0,1254	0,0706	1,2180	0,001329	0,000530	0,000839	64,3	0,0077	2,5076	1,5825	lam.	0,0161
0,0920	0,0621	1,2125	0,001079	0,000436	0,000692	52,2	0,0100	2,4743	1,5867	lam.	0,0142
0,0629	0,0527	1,1953	0,000781	0,000327	0,000522	38,0	0,0154	2,3903	1,5978	lam.	0,0114
0,0386	0,0424	1,1634	0,000530	0,000231	0,000373	24,9	0,0268	2,2891	1,6120	lam.	0,0086
0,0198	0,0311	1,0763	0,000370	0,000165	0,000268	14,3	0,0498	2,2401	1,6194	lam.	0,0063
0,0073	0,0191	0,8543	0,000291	0,000130	0,000210	6,0	0,1188	2,2361	1,6200	lam.	0,0041
0,0012	0,0077	0,4626	0,000196	0,000088	0,000142	1,4	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,0144
-0,0000	0,0003	0,0900	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0012	-0,0072	0,2985	0,000207	0,000092	0,000150	1,2	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,0144
0,0072	-0,0184	0,7205	0,000390	0,000174	0,000282	5,2	0,1363	2,2378	1,6198	lam.	0,0038
0,0199	-0,0302	0,9581	0,000356	0,000159	0,000258	11,5	0,0626	2,2345	1,6203	lam.	0,0057
0,0388	-0,0413	1,0543	0,000523	0,000230	0,000371	22,0	0,0309	2,2750	1,6141	lam.	0,0080
0,0630	-0,0518	1,1217	0,000778	0,000328	0,000525	34,6	0,0174	2,3702	1,6005	lam.	0,0107
0,0921	-0,0612	1,1468	0,000981	0,000411	0,000657	46,1	0,0127	2,3864	1,5982	lam.	0,0125
0,1254	-0,0696	1,1564	0,001277	0,000515	0,000817	59,1	0,0088	2,4786	1,5861	lam.	0,0151
0,1626	-0,0774	1,1770	0,001571	0,000621	0,000981	71,8	0,0067	2,5310	1,5797	lam.	0,0173
0,2032	-0,0842	1,1883	0,001711	0,000695	0,001104	81,8	0,0065	2,4618	1,5882	lam.	0,0176
0,2467	-0,0899	1,1922	0,001955	0,000783	0,001239	93,0	0,0054	2,4979	1,5837	lam.	0,0192
0,2928	-0,0947	1,1993	0,002238	0,000880	0,001388	104,9	0,0045	2,5449	1,5780	lam.	0,0211
0,3408	-0,0986	1,2150	0,002405	0,000954	0,001508	114,4	0,0043	2,5206	1,5809	lam.	0,0217
0,3904	-0,1012	1,2237	0,002450	0,001003	0,001595	121,9	0,0044	2,4433	1,5906	lam.	0,0212
0,4410	-0,1026	1,2415	0,002658	0,001075	0,001705	131,5	0,0039	2,4738	1,5866	lam.	0,0225
0,4921	-0,1025	1,3085	0,002664	0,001108	0,001769	137,7	0,0041	2,4036	1,5958	lam.	0,0220
0,5428	-0,0970	1,2290	0,002172	0,001013	0,001657	132,7	0,0061	2,1442	1,6359	lam.	0,0181
0,5927	-0,0898	1,2095	0,003321	0,001420	0,002145	174,5	0,0014	2,3385	1,5106	turb.	0,0384
0,6414	-0,0797	1,1169	0,003061	0,001565	0,002464	189,3	0,0023	1,9556	1,5740	turb.	0,0293
0,6886	-0,0698	1,0723	0,005361	0,002249	0,003381	250,6	0,0012	2,3838	1,5035	turb.	0,0414
0,7339	-0,0604	1,0419	0,008106	0,010978	0,004221	1143,8	0,0000	0,7384	0,3845	turb.	0,0000
0,7769	-0,0514	1,0118	0,008106	0,010978	0,004221	1110,7	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,8172	-0,0430	0,9874	0,008106	0,010978	0,004221	1084,0	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,8543	-0,0352	0,9585	0,008106	0,010978	0,004221	1052,2	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,8881	-0,0283	0,9438	0,008106	0,010978	0,004221	1036,1	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,9179	-0,0220	0,9145	0,008106	0,010978	0,004221	1004,0	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,9438	-0,0166	0,9204	0,008106	0,010978	0,004221	1010,5	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,9653	-0,0107	0,8009	0,008106	0,010978	0,004221	879,3	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,9823	-0,0074	0,9058	0,008106	0,010978	0,004221	994,4	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
0,9939	-0,0016	0,5625	0,008106	0,010978	0,004221	617,5	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000
1,0000	0,0000	0,3826	0,008106	0,010978	0,004221	420,1	0,0000	0,7384	0,3845	abgel.	0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P. [-]
-49,0	-0,356	0,99112	0,043	0,543	0,002	0,544	0,033	-0,359	0,609	0,369
-48,0	-0,371	0,92070	0,048	0,979	0,002	1,000	0,033	-0,403	0,427	0,379
-47,0	-0,388	0,88173	0,048	0,979	0,002	1,000	0,034	-0,440	0,259	0,374
-46,0	-0,406	0,88589	0,048	0,979	0,002	1,000	0,035	-0,458	0,263	0,369
-45,0	-0,425	0,83309	0,049	0,980	0,003	1,000	0,037	-0,510	0,251	0,364
-44,0	-0,446	0,77276	0,048	0,980	0,003	1,000	0,037	-0,577	0,240	0,359
-43,0	-0,468	0,72607	0,048	0,979	0,003	1,000	0,037	-0,644	0,247	0,353
-42,0	-0,492	0,69020	0,048	0,979	0,003	1,000	0,039	-0,712	0,241	0,348
-41,0	-0,517	0,69054	0,048	0,979	0,003	1,000	0,039	-0,749	0,237	0,342
-40,0	-0,545	0,64777	0,048	0,979	0,003	1,000	0,040	-0,841	0,254	0,337
-39,0	-0,575	0,60789	0,048	0,979	0,003	1,000	0,045	-0,945	0,243	0,334
-38,0	-0,606	0,57871	0,047	0,978	0,004	1,000	0,044	-1,047	0,232	0,328
-37,0	-0,640	0,55049	0,047	0,978	0,004	1,000	0,046	-1,162	0,248	0,323
-36,0	-0,677	0,51135	0,047	0,978	0,004	1,000	0,051	-1,323	0,237	0,319
-35,0	-0,715	0,48059	0,046	0,979	0,004	1,000	0,050	-1,488	0,229	0,314
-34,0	-0,756	0,45017	0,045	0,979	0,004	1,000	0,052	-1,680	0,239	0,310
-33,0	-0,800	0,43156	0,045	0,979	0,004	1,000	0,056	-1,855	0,233	0,306
-32,0	-0,846	0,40129	0,044	0,979	0,004	1,000	0,056	-2,108	0,231	0,302
-31,0	-0,893	0,38001	0,043	0,979	0,004	1,000	0,059	-2,349	0,237	0,298
-30,0	-0,937	0,35182	0,043	0,979	0,005	1,000	0,064	-2,664	0,235	0,295

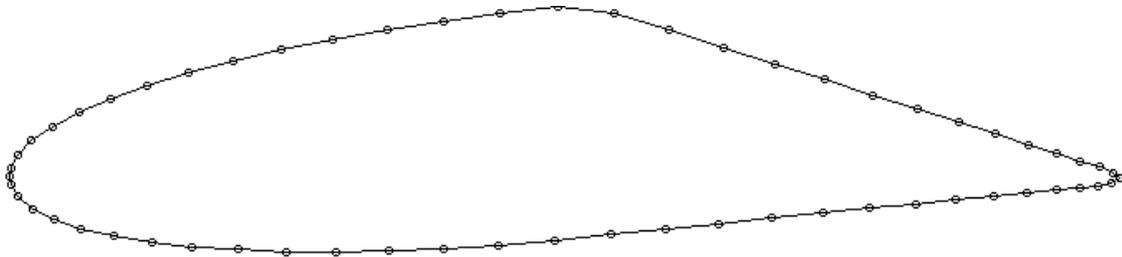
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

-29,0	-0,983	0,32070	0,042	0,979	0,005	1,000	0,069	-3,066	0,237	0,293
-28,0	-1,031	0,29125	0,041	0,977	0,006	0,983	0,079	-3,540	0,232	0,290
-27,0	-1,077	0,27169	0,040	0,977	0,006	0,982	0,082	-3,966	0,226	0,287
-26,0	-1,124	0,25169	0,039	0,979	0,007	0,983	0,088	-4,465	0,224	0,285
-25,0	-1,168	0,23078	0,038	0,979	0,007	0,983	0,092	-5,062	0,233	0,282
-24,0	-1,214	0,20455	0,038	0,978	0,009	1,000	0,112	-5,937	0,248	0,281
-23,0	-1,262	0,17903	0,038	0,978	0,009	0,983	0,146	-7,048	0,229	0,280
-22,0	-1,295	0,16502	0,036	0,977	0,008	1,000	0,151	-7,849	0,236	0,278
-21,0	-1,343	0,13450	0,036	0,977	0,010	1,000	0,221	-9,983	0,242	0,277
-20,0	-1,374	0,11540	0,035	0,976	0,010	0,981	0,265	-11,909	0,261	0,276
-19,0	-1,475	0,06376	0,038	0,975	0,010	0,981	0,550	-23,137	0,255	0,276
-18,0	-1,495	0,05085	0,036	0,975	0,010	0,980	0,620	-29,401	-0,048	0,274
-17,0	-1,491	0,04350	0,033	0,637	0,012	1,000	0,655	-34,268	0,464	0,272
-16,0	-1,469	0,03861	0,030	0,631	0,012	1,000	0,679	-38,055	0,357	0,271
-15,0	-1,435	0,03389	0,027	0,625	0,013	1,000	0,707	-42,349	0,318	0,269
-14,0	-1,379	0,03050	0,024	0,620	0,014	1,000	0,730	-45,223	0,302	0,268
-13,0	-1,314	0,02694	0,021	0,616	0,015	1,000	0,757	-48,771	0,296	0,266
-12,0	-1,237	0,02424	0,018	0,612	0,018	1,000	0,777	-51,036	0,292	0,264
-11,0	-1,152	0,02180	0,014	0,608	0,021	1,000	0,801	-52,839	0,289	0,262
-10,0	-1,058	0,01970	0,011	0,605	0,025	1,000	0,823	-53,715	0,286	0,260
-9,0	-0,957	0,01805	0,007	0,602	0,030	1,000	0,842	-53,013	0,284	0,258
-8,0	-0,850	0,01655	0,004	0,599	0,037	1,000	0,863	-51,341	0,284	0,254
-7,0	-0,740	0,01447	-0,000	0,596	0,086	1,000	0,898	-51,108	0,283	0,250
-6,0	-0,622	0,01326	-0,004	0,593	0,122	1,000	0,918	-46,921	0,282	0,244
-5,0	-0,504	0,00855	-0,008	0,585	0,523	1,000	0,960	-58,953	0,282	0,235
-4,0	-0,380	0,00850	-0,011	0,578	0,524	1,000	0,963	-44,656	0,280	0,220
-3,0	-0,254	0,00842	-0,015	0,572	0,524	1,000	0,965	-30,144	0,281	0,190
-2,0	-0,128	0,00839	-0,019	0,566	0,526	1,000	0,987	-15,270	0,281	0,100
-1,0	-0,001	0,00734	-0,023	0,561	0,528	1,000	0,988	-0,153	0,280	-20,227
0,0	0,126	0,00748	-0,027	0,557	0,529	1,000	0,988	16,881	0,280	0,462
1,0	0,254	0,00760	-0,031	0,552	0,530	1,000	0,988	33,343	0,280	0,371
2,0	0,381	0,00766	-0,034	0,548	0,533	1,000	0,988	49,674	0,280	0,340
3,0	0,507	0,00789	-0,038	0,545	0,534	1,000	0,989	64,245	0,280	0,325
4,0	0,632	0,00827	-0,042	0,534	0,535	1,000	0,988	76,448	0,280	0,316
5,0	0,756	0,00865	-0,046	0,525	0,536	1,000	0,988	87,406	0,279	0,310
6,0	0,873	0,01451	-0,049	0,063	0,539	0,971	0,988	60,149	0,279	0,306
7,0	0,984	0,01353	-0,052	0,050	0,542	0,935	0,988	72,707	0,279	0,303
8,0	1,088	0,01326	-0,055	0,036	0,605	0,897	0,989	82,053	0,280	0,301
9,0	1,188	0,01734	-0,058	0,031	0,608	0,873	0,990	68,503	0,282	0,299
10,0	1,281	0,01921	-0,061	0,027	0,610	0,850	0,991	66,680	0,284	0,298
11,0	1,365	0,02133	-0,064	0,024	0,613	0,825	0,991	64,006	0,286	0,297
12,0	1,439	0,02429	-0,067	0,020	0,615	0,793	0,991	59,216	0,289	0,297
13,0	1,502	0,02757	-0,070	0,018	0,618	0,765	0,991	54,489	0,295	0,296
14,0	1,551	0,03106	-0,072	0,015	0,621	0,737	0,990	49,920	0,311	0,297
15,0	1,579	0,03622	-0,074	0,013	0,624	0,701	0,990	43,589	0,349	0,297
16,0	1,596	0,04111	-0,077	0,012	0,628	0,675	0,990	38,825	0,498	0,298
17,0	1,595	0,04836	-0,078	0,011	0,631	0,637	0,991	32,988	-0,052	0,299
18,0	1,584	0,05595	-0,080	0,011	0,635	0,606	0,991	28,313	0,222	0,301
19,0	1,539	0,07344	-0,080	0,010	0,640	0,510	0,991	20,954	0,318	0,302
20,0	1,418	0,13010	-0,069	0,009	0,951	0,217	0,957	10,897	0,329	0,299
21,0	1,370	0,15524	-0,067	0,008	0,951	0,160	0,957	8,822	0,273	0,299
22,0	1,329	0,17299	-0,067	0,008	0,952	0,143	0,958	7,681	0,260	0,300
23,0	1,279	0,19570	-0,066	0,007	0,952	0,116	0,959	6,538	0,266	0,301
24,0	1,230	0,21758	-0,065	0,006	0,953	0,101	0,959	5,655	0,248	0,303
25,0	1,182	0,23908	-0,066	0,006	0,953	0,095	0,960	4,943	0,251	0,306
26,0	1,130	0,26212	-0,065	0,005	0,953	0,082	0,960	4,310	0,247	0,308
27,0	1,081	0,28136	-0,066	0,005	0,953	0,080	0,961	3,840	0,237	0,311
28,0	1,031	0,30624	-0,067	0,005	0,954	0,076	0,960	3,366	0,258	0,315
29,0	0,980	0,33945	-0,065	0,004	0,954	0,064	0,961	2,886	0,258	0,317
30,0	0,926	0,36543	-0,066	0,004	0,954	0,061	0,962	2,534	0,245	0,321
31,0	0,875	0,38392	-0,066	0,004	0,955	0,059	0,962	2,279	0,243	0,325
32,0	0,826	0,42416	-0,066	0,004	0,955	0,057	0,963	1,948	0,241	0,330
33,0	0,781	0,43253	-0,067	0,004	0,955	0,056	0,964	1,805	0,243	0,335
34,0	0,737	0,46967	-0,067	0,003	0,955	0,054	0,965	1,570	0,245	0,341
35,0	0,697	0,50809	-0,067	0,003	0,955	0,053	0,964	1,371	0,251	0,346
36,0	0,658	0,51927	-0,067	0,003	0,955	0,050	0,965	1,268	0,249	0,352
37,0	0,623	0,55673	-0,067	0,003	0,955	0,049	0,989	1,119	0,235	0,358
38,0	0,590	0,58157	-0,068	0,003	0,955	0,050	0,989	1,015	0,241	0,365
39,0	0,559	0,61999	-0,068	0,003	0,956	0,049	0,990	0,902	0,256	0,371
40,0	0,531	0,65275	-0,068	0,003	0,956	0,047	0,990	0,813	0,280	0,377
41,0	0,504	0,70442	-0,066	0,003	0,956	0,042	0,990	0,715	0,285	0,381
42,0	0,479	0,74290	-0,066	0,003	0,956	0,041	0,990	0,645	0,269	0,387

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

43,0	0,456	0,77452	-0,065	0,003	0,956	0,039	0,990	0,588	0,269	0,393
44,0	0,434	0,80379	-0,065	0,003	0,956	0,039	0,990	0,540	0,263	0,399
45,0	0,415	0,82913	-0,065	0,002	0,958	0,039	0,990	0,500	0,267	0,406
46,0	0,396	0,84716	-0,064	0,003	0,958	0,038	0,990	0,468	0,272	0,412
47,0	0,379	0,91539	-0,064	0,002	0,958	0,038	0,990	0,414	0,494	0,419
48,0	0,363	0,97400	-0,056	0,002	0,543	0,037	0,543	0,373	0,520	0,405
49,0	0,348	0,99987	-0,056	0,002	0,543	0,037	0,544	0,348	0,293	0,410
50,0	0,334	1,02635	-0,055	0,002	0,544	0,036	0,545	0,325	0,296	0,414

(6) ERpLK 05 50 20 LUFT RE 10E6



1,0000	0,0000
0,9943	0,0052
0,9824	0,0099
0,9655	0,0153
0,9441	0,0222
0,9184	0,0302
0,8886	0,0398
0,8551	0,0505
0,8181	0,0623
0,7779	0,0750
0,7351	0,0888
0,6900	0,1032
0,6430	0,1181
0,5946	0,1336
0,5452	0,1479
0,4935	0,1534
0,4415	0,1487
0,3902	0,1419
0,3399	0,1343
0,2914	0,1255
0,2450	0,1161
0,2012	0,1060
0,1605	0,0951
0,1234	0,0836
0,0903	0,0716
0,0616	0,0593
0,0378	0,0466
0,0195	0,0336
0,0072	0,0207

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,0012 0,0091
-0,000 0,0015
0,0012 -0,0059
0,0072 -0,0170
0,0201 -0,0281
0,0395 -0,0378
0,0642 -0,0460
0,0936 -0,0527
0,1272 -0,0581
0,1644 -0,0621
0,2050 -0,0648
0,2483 -0,0667
0,2940 -0,0670
0,3416 -0,0657
0,3906 -0,0637
0,4405 -0,0604
0,4908 -0,0561
0,5411 -0,0508
0,5909 -0,0459
0,6397 -0,0410
0,6870 -0,0362
0,7325 -0,0315
0,7757 -0,0274
0,8161 -0,0232
0,8534 -0,0194
0,8873 -0,0162
0,9173 -0,0132
0,9432 -0,0105
0,9648 -0,0083
0,9819 -0,0070
0,9937 -0,0042
1,0000 0,0000

x/t	x/t	v/V
1,00000	0,00000	0,49001
0,99430	0,00520	0,97477
0,98240	0,00990	0,90616
0,96550	0,01530	0,90669
0,94410	0,02220	0,94176
0,91840	0,03020	0,95716
0,88860	0,03980	0,99540
0,85510	0,05050	1,02620
0,81810	0,06230	1,06113
0,77790	0,07500	1,09121
0,73510	0,08880	1,14028
0,69000	0,10320	1,19091
0,64300	0,11810	1,25267
0,59460	0,13360	1,36922
0,54520	0,14790	1,60749
0,49350	0,15340	1,66172
0,44150	0,14870	1,46255
0,39020	0,14190	1,38506
0,33990	0,13430	1,35453

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,29140	0,12550	1,31528
0,24500	0,11610	1,29520
0,20120	0,10600	1,27863
0,16050	0,09510	1,25622
0,12340	0,08360	1,23289
0,09030	0,07160	1,20334
0,06160	0,05930	1,17305
0,03780	0,04660	1,11996
0,01950	0,03360	1,01562
0,00720	0,02070	0,81005
0,00120	0,00910	0,45176
-0,00000	0,00150	0,08610
0,00120	-0,00590	0,29829
0,00720	-0,01700	0,75062
0,02010	-0,02810	1,00312
0,03950	-0,03780	1,09292
0,06420	-0,04600	1,13222
0,09360	-0,05270	1,14284
0,12720	-0,05810	1,14889
0,16440	-0,06210	1,14521
0,20500	-0,06480	1,13180
0,24830	-0,06670	1,14127
0,29400	-0,06700	1,13194
0,34160	-0,06570	1,10531
0,39060	-0,06370	1,10119
0,44050	-0,06040	1,08147
0,49080	-0,05610	1,06203
0,54110	-0,05080	1,02261
0,59090	-0,04590	1,01134
0,63970	-0,04100	0,99613
0,68700	-0,03620	0,98278
0,73250	-0,03150	0,96376
0,77570	-0,02740	0,96368
0,81610	-0,02320	0,94426
0,85340	-0,01940	0,92895
0,88730	-0,01620	0,92622
0,91730	-0,01320	0,91315
0,94320	-0,01050	0,89619
0,96480	-0,00830	0,87570
0,98190	-0,00700	0,95910
0,99370	-0,00420	0,96665
1,00000	0,00000	0,49001

x/l	y/l	v/V	δ_1	δ_2	δ_3	Re δ_2	C _f	H ₁₂	H ₃₂	Zust.	y1
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
1,0000	0,0000	0,4900	0,003246	0,007974	0,001713	390,8	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,9943	0,0052	0,9748	0,003246	0,007974	0,001713	777,3	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,9824	0,0099	0,9062	0,003246	0,007974	0,001713	722,6	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,9655	0,0153	0,9067	0,003246	0,007974	0,001713	723,0	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,9441	0,0222	0,9418	0,003246	0,007974	0,001713	751,0	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,9184	0,0302	0,9572	0,003246	0,007974	0,001713	763,3	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,8886	0,0398	0,9954	0,003246	0,007974	0,001713	793,8	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,8551	0,0505	1,0262	0,003246	0,007974	0,001713	818,3	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,8181	0,0623	1,0611	0,003246	0,007974	0,001713	846,2	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,7779	0,0750	1,0912	0,003246	0,007974	0,001713	870,2	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,7351	0,0888	1,1403	0,003246	0,007974	0,001713	909,3	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,6900	0,1032	1,1909	0,003246	0,007974	0,001713	949,7	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,6430	0,1181	1,2527	0,003246	0,007974	0,001713	999,0	0,0000	0,4070	0,2148	abgel.	0,0000
0,5946	0,1336	1,3693	0,003246	0,007974	0,001713	1091,9	0,0000	0,4070	0,2148	lam.	0,0000
0,5452	0,1479	1,6074	0,001382	0,000689	0,001147	114,9	0,0086	2,0063	1,6648	lam.	0,0152
0,4935	0,1534	1,6616	0,001885	0,000868	0,001416	127,2	0,0061	2,1711	1,6310	lam.	0,0181
0,4415	0,1487	1,4626	0,002172	0,000926	0,001486	128,3	0,0048	2,3448	1,6038	lam.	0,0204
0,3902	0,1419	1,3851	0,002062	0,000887	0,001426	120,2	0,0053	2,3243	1,6068	lam.	0,0195
0,3399	0,1343	1,3545	0,002126	0,000874	0,001391	115,0	0,0048	2,4329	1,5919	lam.	0,0205
0,2914	0,1255	1,3153	0,002004	0,000814	0,001292	105,4	0,0050	2,4623	1,5881	lam.	0,0200
0,2450	0,1161	1,2952	0,001815	0,000742	0,001181	95,0	0,0057	2,4440	1,5905	lam.	0,0187

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

0,2012	0,1060	1,2786	0,001644	0,000670	0,001065	84,2	0,0063	2,4540	1,5892	lam.	0,0178
0,1605	0,0951	1,2562	0,001446	0,000592	0,000941	73,0	0,0074	2,4446	1,5904	lam.	0,0164
0,1234	0,0836	1,2329	0,001272	0,000517	0,000821	62,3	0,0085	2,4602	1,5885	lam.	0,0153
0,0903	0,0716	1,2033	0,001016	0,000419	0,000668	49,2	0,0114	2,4223	1,5934	lam.	0,0133
0,0616	0,0593	1,1730	0,000782	0,000332	0,000532	37,4	0,0164	2,3545	1,6027	lam.	0,0110
0,0378	0,0466	1,1200	0,000557	0,000243	0,000392	24,7	0,0270	2,2908	1,6118	lam.	0,0086
0,0195	0,0336	1,0156	0,000388	0,000173	0,000281	14,2	0,0501	2,2414	1,6192	lam.	0,0063
0,0072	0,0207	0,8100	0,000297	0,000133	0,000215	6,0	0,1189	2,2361	1,6200	lam.	0,0041
0,0012	0,0091	0,4518	0,000202	0,000090	0,000146	1,4	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
-0,0000	0,0015	0,0861	0,000001	0,000000	0,000001	0,0	0,0000	2,2364	1,6200	lam.	0,0000
0,0012	-0,0059	0,2983	0,000222	0,000099	0,000160	1,3	0,0001	2,2364	1,6200	lam.	0,1414
0,0072	-0,0170	0,7506	0,000384	0,000172	0,000278	5,1	0,1385	2,2380	1,6197	lam.	0,0038
0,0201	-0,0281	1,0031	0,000343	0,000153	0,000249	11,7	0,0614	2,2345	1,6203	lam.	0,0057
0,0395	-0,0378	1,0929	0,000503	0,000221	0,000357	22,2	0,0307	2,2757	1,6140	lam.	0,0081
0,0642	-0,0460	1,1322	0,000773	0,000324	0,000518	35,4	0,0167	2,3865	1,5983	lam.	0,0110
0,0936	-0,0527	1,1428	0,001047	0,000427	0,000678	48,3	0,0111	2,4539	1,5893	lam.	0,0134
0,1272	-0,0581	1,1489	0,001378	0,000544	0,000859	62,2	0,0077	2,5338	1,5793	lam.	0,0161
0,1644	-0,0621	1,1452	0,001647	0,000646	0,001019	74,3	0,0063	2,5490	1,5775	lam.	0,0178
0,2050	-0,0648	1,1318	0,001974	0,000754	0,001184	86,4	0,0049	2,6165	1,5700	lam.	0,0201
0,2483	-0,0667	1,1413	0,002423	0,000884	0,001377	100,0	0,0036	2,7413	1,5583	lam.	0,0236
0,2940	-0,0670	1,1319	0,002377	0,000941	0,001487	107,4	0,0045	2,5263	1,5803	lam.	0,0211
0,3416	-0,0657	1,1053	0,002873	0,001068	0,001669	120,9	0,0032	2,6896	1,5630	lam.	0,0250
0,3906	-0,0637	1,1012	0,004023	0,001249	0,001909	138,0	0,0012	3,2214	1,5284	lam.	0,0406
0,4405	-0,0604	1,0815	0,003733	0,001317	0,002043	145,1	0,0022	2,8338	1,5510	lam.	0,0304
0,4908	-0,0561	1,0620	0,004835	0,001483	0,002265	160,4	0,0010	3,2591	1,5272	lam.	0,0453
0,5411	-0,0508	1,0226	0,003572	0,001655	0,002546	175,7	0,0018	2,1582	1,5380	turb.	0,0337
0,5909	-0,0459	1,0113	0,004157	0,001985	0,003072	202,7	0,0019	2,0945	1,5477	turb.	0,0327
0,6397	-0,0410	0,9961	0,004014	0,002126	0,003375	215,0	0,0025	1,8884	1,5878	turb.	0,0283
0,6870	-0,0362	0,9828	0,004142	0,002328	0,003754	231,8	0,0029	1,7792	1,6128	turb.	0,0262
0,7325	-0,0315	0,9638	0,004309	0,002517	0,004102	247,3	0,0032	1,7121	1,6301	turb.	0,0251
0,7757	-0,0274	0,9637	0,004724	0,002791	0,004564	268,8	0,0032	1,6926	1,6352	turb.	0,0249
0,8161	-0,0232	0,9443	0,004644	0,002866	0,004748	276,2	0,0036	1,6203	1,6566	turb.	0,0236
0,8534	-0,0194	0,9289	0,005134	0,003149	0,005205	297,3	0,0035	1,6307	1,6530	turb.	0,0240
0,8873	-0,0162	0,9262	0,005581	0,003408	0,005626	316,6	0,0034	1,6376	1,6510	turb.	0,0243
0,9173	-0,0132	0,9132	0,005632	0,003503	0,005817	324,5	0,0035	1,6075	1,6604	turb.	0,0238
0,9432	-0,0105	0,8962	0,006085	0,003754	0,006217	342,6	0,0034	1,6209	1,6560	turb.	0,0242
0,9648	-0,0083	0,8757	0,006693	0,004046	0,006658	362,6	0,0032	1,6544	1,6457	turb.	0,0250
0,9819	-0,0070	0,9591	0,007705	0,004470	0,007268	390,8	0,0028	1,7239	1,6260	turb.	0,0267
0,9937	-0,0042	0,9667	0,004945	0,003354	0,005734	321,7	0,0044	1,4744	1,7095	turb.	0,0212
1,0000	0,0000	0,4900	0,020130	0,003912	0,010290	191,7	0,0000	5,1458	2,6304	turb.	0,0000

α [°]	Ca [-]	Cw [-]	Cm 0.25 [-]	T.U. [-]	T.L. [-]	S.U. [-]	S.L. [-]	GZ [-]	N.P. [-]	D.P. [-]
-49,0	-0,351	0,94600	-0,008	1,000	0,003	1,000	0,037	-0,371	0,291	0,227
-48,0	-0,366	0,92994	-0,007	1,000	0,003	1,000	0,037	-0,393	0,290	0,230
-47,0	-0,381	0,89873	-0,007	1,000	0,003	1,000	0,036	-0,424	0,282	0,232
-46,0	-0,398	0,85876	-0,006	1,000	0,004	1,000	0,037	-0,463	0,274	0,234
-45,0	-0,416	0,84746	-0,006	1,000	0,004	1,000	0,038	-0,491	0,270	0,236
-44,0	-0,435	0,77295	-0,006	1,000	0,004	1,000	0,038	-0,563	0,265	0,237
-43,0	-0,456	0,73683	-0,005	1,000	0,004	1,000	0,039	-0,618	0,260	0,238
-42,0	-0,478	0,70852	-0,005	1,000	0,004	1,000	0,039	-0,674	0,256	0,239
-41,0	-0,501	0,68005	-0,005	1,000	0,004	1,000	0,040	-0,737	0,251	0,240
-40,0	-0,527	0,63442	-0,005	1,000	0,005	1,000	0,043	-0,830	0,249	0,240
-39,0	-0,554	0,61206	-0,005	1,000	0,005	1,000	0,043	-0,905	0,247	0,241
-38,0	-0,582	0,57439	-0,005	1,000	0,005	1,000	0,045	-1,013	0,243	0,241
-37,0	-0,609	0,53914	-0,005	1,000	0,005	1,000	0,046	-1,130	0,240	0,241
-36,0	-0,638	0,51707	-0,006	1,000	0,006	1,000	0,049	-1,234	0,239	0,241
-35,0	-0,668	0,48448	-0,006	1,000	0,006	1,000	0,048	-1,379	0,237	0,241
-34,0	-0,700	0,45408	-0,007	1,000	0,006	1,000	0,050	-1,542	0,234	0,241
-33,0	-0,734	0,42409	-0,007	1,000	0,007	1,000	0,051	-1,730	0,232	0,240
-32,0	-0,769	0,39706	-0,008	1,000	0,007	1,000	0,054	-1,937	0,230	0,240
-31,0	-0,805	0,37222	-0,009	1,000	0,007	1,000	0,057	-2,163	0,230	0,239
-30,0	-0,841	0,34692	-0,009	0,590	0,008	1,000	0,054	-2,424	0,225	0,239
-29,0	-0,881	0,31724	-0,011	0,584	0,009	1,000	0,066	-2,776	0,222	0,238
-28,0	-0,917	0,30342	-0,011	0,578	0,008	1,000	0,064	-3,023	0,224	0,238
-27,0	-0,954	0,27961	-0,012	0,575	0,010	1,000	0,064	-3,411	0,216	0,237

Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

-26,0	-0,991	0,25534	-0,014	0,572	0,010	1,000	0,075	-3,883	0,209	0,236
-25,0	-1,026	0,23523	-0,015	0,569	0,009	1,000	0,082	-4,363	0,205	0,235
-24,0	-1,057	0,21793	-0,017	0,568	0,010	1,000	0,085	-4,850	0,196	0,234
-23,0	-1,085	0,19636	-0,019	0,566	0,011	1,000	0,092	-5,523	0,177	0,233
-22,0	-1,108	0,17976	-0,021	0,563	0,010	1,000	0,106	-6,165	0,146	0,231
-21,0	-1,126	0,15989	-0,023	0,562	0,011	1,000	0,121	-7,040	0,083	0,230
-20,0	-1,137	0,14114	-0,025	0,562	0,011	1,000	0,146	-8,059	-0,126	0,228
-19,0	-1,140	0,12492	-0,028	0,562	0,011	1,000	0,170	-9,125	0,955	0,225
-18,0	-1,129	0,10690	-0,031	0,560	0,011	1,000	0,205	-10,562	0,712	0,222
-17,0	-1,122	0,08147	-0,036	0,560	0,013	1,000	0,305	-13,777	0,471	0,218
-16,0	-1,091	0,06872	-0,040	0,559	0,012	1,000	0,351	-15,876	0,393	0,214
-15,0	-1,064	0,05081	-0,045	0,559	0,013	1,000	0,459	-20,932	0,372	0,208
-14,0	-1,016	0,03992	-0,049	0,557	0,014	1,000	0,532	-25,455	0,341	0,202
-13,0	-0,964	0,02953	-0,054	0,557	0,016	1,000	0,638	-32,638	0,333	0,194
-12,0	-0,899	0,02251	-0,059	0,554	0,019	1,000	0,740	-39,922	0,318	0,185
-11,0	-0,821	0,01793	-0,064	0,556	0,022	1,000	0,841	-45,795	0,308	0,173
-10,0	-0,731	0,01372	-0,068	0,556	0,027	1,000	0,928	-53,240	0,295	0,156
-9,0	-0,623	0,01335	-0,072	0,554	0,029	1,000	0,960	-46,695	0,288	0,134
-8,0	-0,510	0,01377	-0,077	0,554	0,034	1,000	0,996	-37,024	0,284	0,100
-7,0	-0,388	0,01289	-0,080	0,553	0,039	1,000	0,997	-30,145	0,281	0,043
-6,0	-0,264	0,01187	-0,084	0,551	0,072	1,000	0,997	-22,237	0,281	-0,070
-5,0	-0,138	0,01082	-0,088	0,551	0,138	1,000	0,997	-12,731	0,281	-0,391
-4,0	-0,011	0,01032	-0,092	0,551	0,184	1,000	0,997	-1,024	0,276	-8,470
-3,0	0,117	0,00891	-0,095	0,551	0,309	0,935	0,998	13,095	0,275	1,063
-2,0	0,244	0,00883	-0,099	0,550	0,325	0,918	0,998	27,615	0,267	0,654
-1,0	0,371	0,00863	-0,099	0,550	0,342	0,779	0,998	42,958	0,252	0,518
0,0	0,461	0,01101	-0,099	0,550	0,456	0,633	0,998	41,835	0,261	0,465
1,0	0,573	0,01162	-0,101	0,550	0,492	0,593	0,997	49,289	0,279	0,427
2,0	0,690	0,01178	-0,106	0,548	0,501	0,606	0,997	58,550	0,283	0,403
3,0	0,803	0,01235	-0,109	0,548	0,509	0,593	0,997	65,041	0,280	0,386
4,0	0,917	0,01304	-0,112	0,548	0,520	0,589	0,998	70,272	0,282	0,373
5,0	1,029	0,01382	-0,116	0,548	0,530	0,584	0,998	74,497	0,283	0,363
6,0	1,143	0,01454	-0,120	0,547	0,541	0,589	0,997	78,628	0,283	0,355
7,0	1,255	0,01475	-0,124	0,547	0,925	0,586	0,996	85,087	0,297	0,348
8,0	1,389	0,02469	-0,131	0,057	0,937	0,687	0,996	56,263	0,299	0,345
9,0	1,488	0,02732	-0,135	0,038	0,948	0,683	0,996	54,491	0,288	0,341
10,0	1,581	0,02996	-0,139	0,029	0,954	0,678	0,997	52,778	0,291	0,338
11,0	1,668	0,03287	-0,142	0,021	0,962	0,675	0,997	50,736	0,295	0,335
12,0	1,743	0,03564	-0,146	0,017	0,996	0,674	0,996	48,913	0,303	0,334
13,0	1,801	0,03917	-0,150	0,015	0,996	0,667	0,996	45,983	0,317	0,333
14,0	1,847	0,04257	-0,153	0,014	0,996	0,664	0,996	43,389	0,340	0,333
15,0	1,878	0,04604	-0,156	0,013	0,996	0,658	0,996	40,786	0,391	0,333
16,0	1,894	0,05030	-0,160	0,011	0,996	0,652	0,996	37,662	0,602	0,334
17,0	1,897	0,05505	-0,163	0,010	0,996	0,646	0,996	34,451	-0,504	0,336
18,0	1,886	0,05998	-0,166	0,009	0,996	0,642	0,996	31,441	0,072	0,338
19,0	1,861	0,06589	-0,169	0,007	0,996	0,634	0,996	28,249	0,158	0,341
20,0	1,824	0,07220	-0,172	0,006	0,996	0,622	0,996	25,263	0,186	0,344
21,0	1,778	0,07881	-0,175	0,006	0,996	0,612	0,996	22,559	0,211	0,348
22,0	1,717	0,09136	-0,176	0,005	0,996	0,583	0,996	18,794	0,358	0,353
23,0	1,532	0,16657	-0,148	0,005	0,996	0,225	0,996	9,195	0,388	0,347
24,0	1,451	0,20209	-0,139	0,004	0,996	0,153	0,996	7,179	0,328	0,346
25,0	1,375	0,22827	-0,136	0,004	0,996	0,125	0,996	6,025	0,293	0,349
26,0	1,300	0,25326	-0,133	0,003	0,996	0,103	0,996	5,135	0,279	0,352
27,0	1,229	0,27854	-0,132	0,003	0,996	0,092	0,996	4,413	0,264	0,357
28,0	1,161	0,30213	-0,131	0,004	0,996	0,083	0,996	3,841	0,261	0,363
29,0	1,094	0,32657	-0,130	0,003	0,996	0,076	0,996	3,351	0,246	0,369
30,0	1,032	0,35295	-0,131	0,003	0,995	0,075	0,995	2,925	0,245	0,377
31,0	0,972	0,37670	-0,131	0,003	0,996	0,069	0,996	2,581	0,256	0,385
32,0	0,916	0,40168	-0,131	0,003	0,996	0,064	0,996	2,279	0,245	0,393
33,0	0,863	0,42190	-0,131	0,003	0,996	0,063	0,996	2,045	0,235	0,402
34,0	0,813	0,46059	-0,132	0,003	0,996	0,062	0,996	1,766	0,256	0,412
35,0	0,766	0,47688	-0,131	0,003	0,996	0,056	0,996	1,606	0,252	0,421
36,0	0,723	0,51342	-0,132	0,002	0,996	0,056	0,996	1,408	0,232	0,433
37,0	0,683	0,55456	-0,132	0,002	0,996	0,055	0,996	1,231	0,279	0,444
38,0	0,644	0,57649	-0,130	0,002	0,995	0,048	0,995	1,118	0,285	0,451
39,0	0,610	0,61914	-0,130	0,002	0,995	0,046	0,995	0,985	0,248	0,463
40,0	0,577	0,66428	-0,130	0,002	0,995	0,045	0,995	0,869	0,238	0,475
41,0	0,547	0,66409	-0,131	0,002	0,996	0,045	0,996	0,824	0,234	0,489

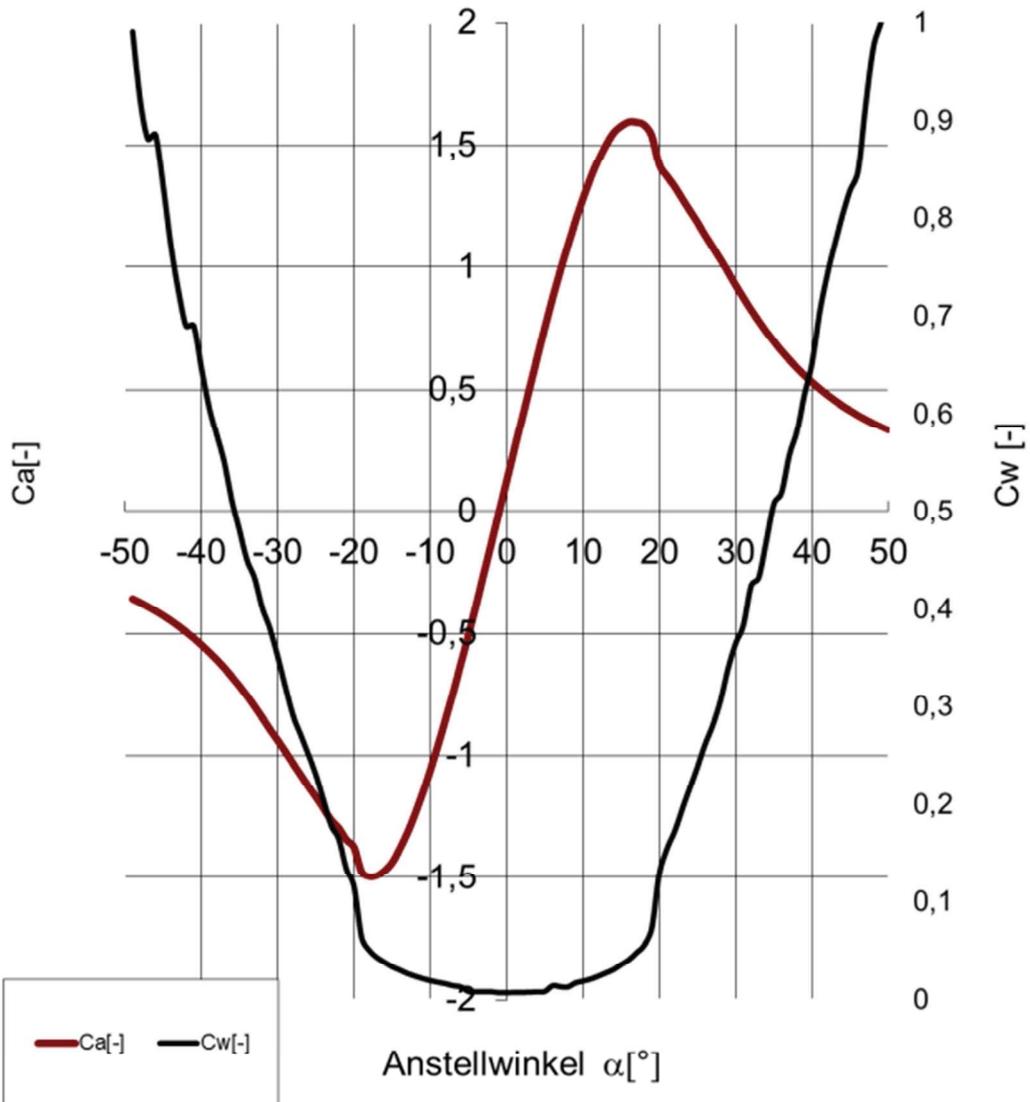
Dossier über den Forschungsbedarf der CARPO-Technologie für Rotationssysteme

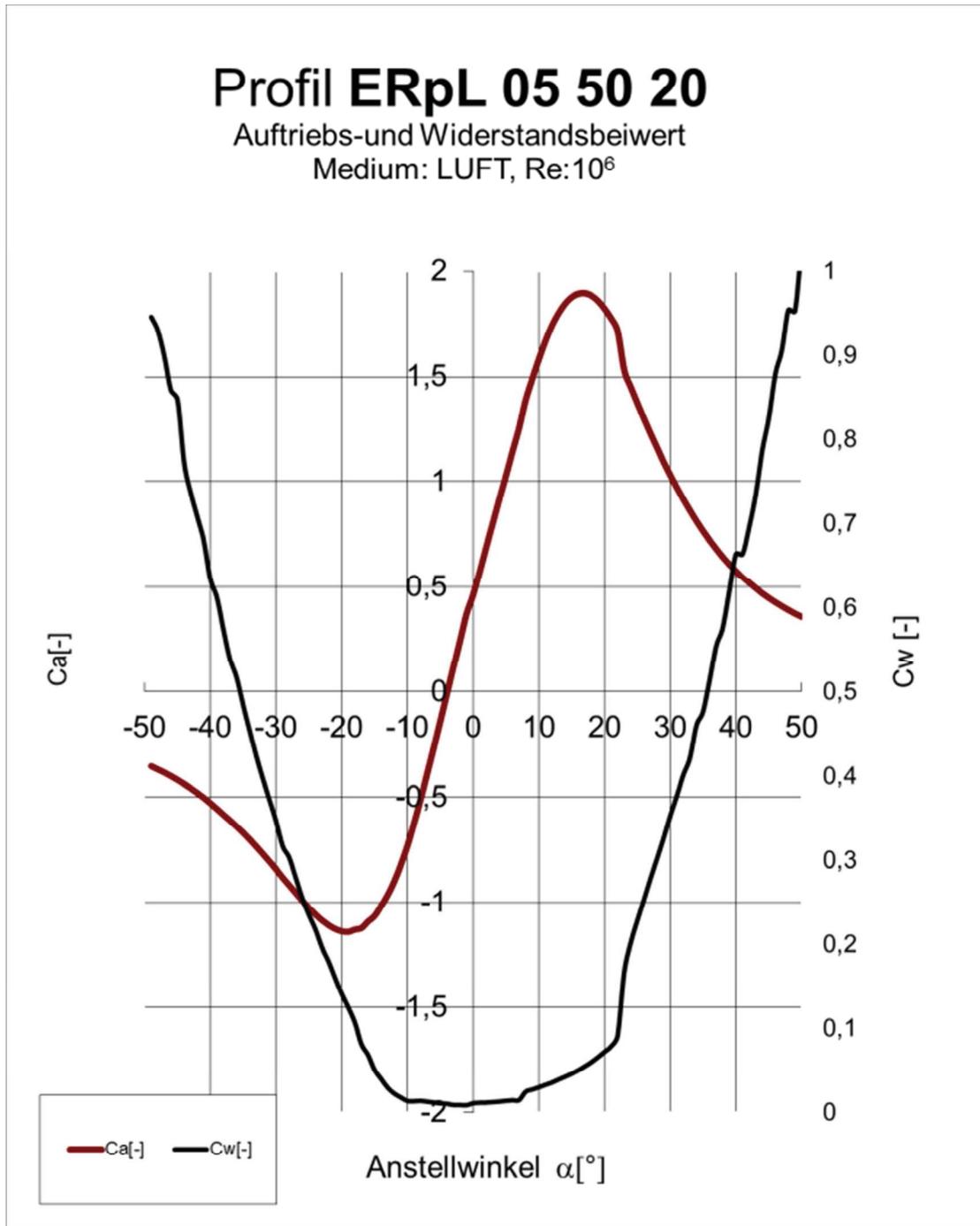
42,0	0,520	0,69497	-0,131	0,002	0,996	0,044	0,996	0,748	0,252	0,502
43,0	0,494	0,73337	-0,130	0,002	0,995	0,043	0,995	0,673	0,315	0,514
44,0	0,469	0,78593	-0,127	0,002	0,996	0,037	0,996	0,597	0,315	0,522
45,0	0,447	0,82479	-0,127	0,002	0,996	0,036	0,996	0,542	0,254	0,535
46,0	0,427	0,87712	-0,127	0,002	0,996	0,036	0,996	0,486	0,623	0,548
47,0	0,408	0,90615	-0,113	0,002	0,543	0,035	0,544	0,450	0,655	0,526
48,0	0,390	0,95443	-0,112	0,002	0,543	0,035	0,544	0,408	0,280	0,538
49,0	0,373	0,95310	-0,112	0,002	0,543	0,033	0,544	0,391	0,275	0,549
50,0	0,358	1,02868	-0,112	0,001	0,542	0,033	0,543	0,348	0,252	0,562

Profil ERpL 00 50 20

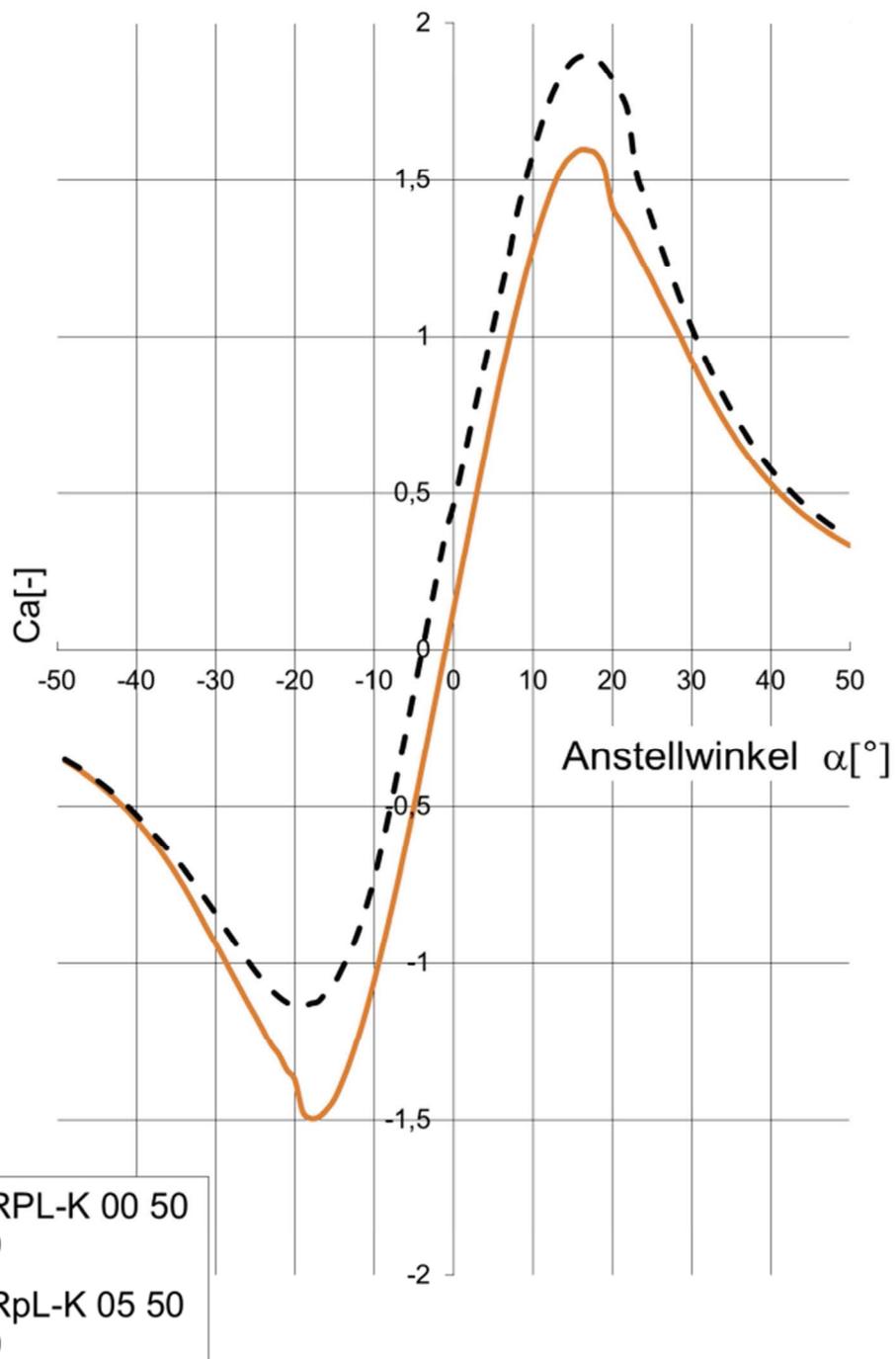
Auftriebs- und Widerstandsbeiwert

Medium: LUFT, $Re: 10^6$



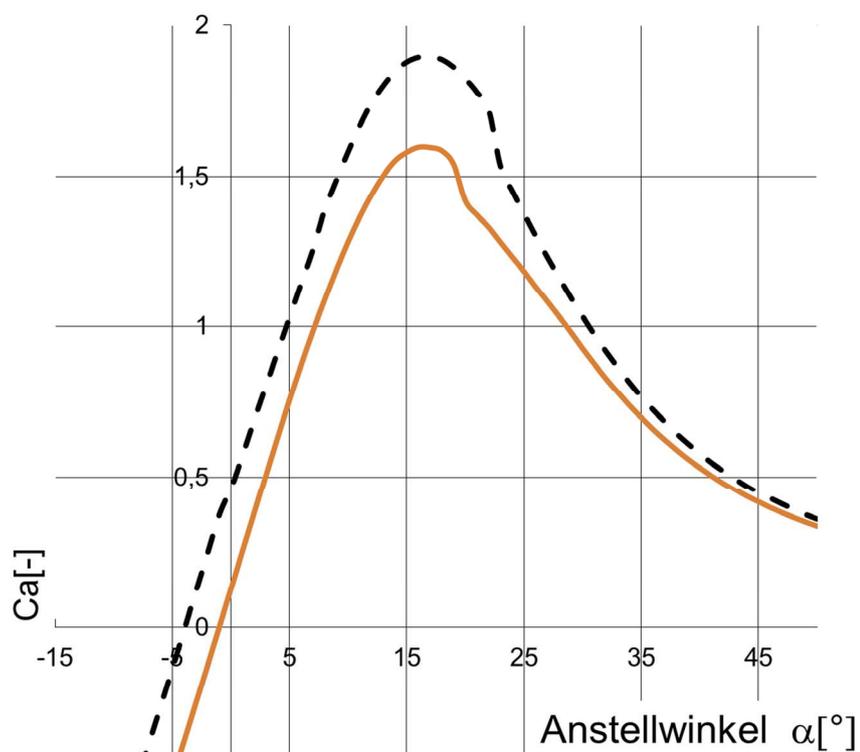


PROFILE ERpL-K 00 50 20
und ERpL-K 05 50 20
Auftriebsbeiwert C_A
Medium: Luft, $Re:10^6$



PROFILE ERpL-K 00 50 20 und ERpL-K 05 50 20

Auftriebsbeiwert C_A
Medium: Luft, $Re: 10^6$



- ERpL-K 00 50 20
- ERpL-K 05 50 20

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 hochladen
und kostenlos publizieren

