

# UNTERSUCHUNGEN AN PROPELLERANTRIEBEN UNTER KRYOGENEN BEDINGUNGEN

Ann-Katrin Hensch, B.Eng, FH Aachen  
Prof. Dr.-Ing. Frank Janser, FH Aachen, Strömungslabor  
Dipl.-Ing. Jürgen Quest, European Transonic Windtunnel

## Abstract

Die in der ACARE Vision2020 definierten Zielsetzungen der Europäischen Industrie und Forschung, die eine Reduktion des Kohlendioxidaustoßes um 50% und eine Herabsenkung der emittierten Stickoxyde um 80% fordern, werden treibstoffeffizientere Triebwerkskonzepte, wie das des "Counterrotating Open Rotors"(CROR) untersucht. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projektes „Integrierte Triebwerks Simulation“ (ITS) wird angestrebt zwei elektrisch angetriebene, gegenläufig rotierende Propeller in kryogener Umgebung im European Transonic Windtunnel (ETW) bei Flugreynoldszahlen zu betreiben. Ziel ist dabei, die zukünftige Generation der CROR-Triebwerke an Flugmodellen in einer Windkanalströmung mittels eines Antriebs durch Elektromotoren zu simulieren, um aerodynamische Interferenzen zwischen Antriebs- und Bauteilströmung untersuchen zu können. Dazu wurden vorbereitende Standschubtests mit modifizierten Modellmotoren unter Einsatz verfügbarer Propellerblätter, sowohl bei Umgebungstemperaturen als auch bei 120K (-160°), durchgeführt und Messwerte bei verschiedenen Blattstellwinkeln aufgenommen. Der verwendete Elektromotor darf dabei gewisse Abmaße nicht überschreiten, um die Integration in skalierte Windkanalmodelle maßstabsgetreu gewährleisten zu können. Als Motoren wurden daher am Anfang Modellmotoren mit unterschiedlichen Lagertypen bei kryogenen Bedingungen untersucht.

## 1. DAS COUNTER-ROTATING OPEN ROTOR KONZEPT

Die Verwendung von Open Rotor Technologien bei Antriebskonzepten garantiert bei gleichem Schub eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs sowie

eine Emissionssenkung des Kohlenstoffdioxids ( $CO_2$ ) im Vergleich mit Turbofan-Antrieben.

Turbofan-Antriebe können durch ein größeres Bypassverhältnis und durch einen größeren Fandurchmesser einen höheren Wirkungsgrad erreichen.

Dieser kann jedoch nicht beliebig vergrößert werden, da sowohl das wachsende Gewicht als auch der Widerstand eine Limitierung darstellen. Open Rotor Antriebe haben im Gegensatz dazu eine deutlich niedrigere Widerstandserzeugung.

Der Vorteil eines CROR ist, dass die Energie aus dem Randspitzenwirbel des vorderen Propellers noch durch den hinteren Propeller aufgenommen wird. Zielsetzung einer solchen Anordnung ist eine möglichst drallfreie Abströmung, was einen guten Wirkungsgrad zur Folge hat. CROR-Triebwerke zeichnen sich, wie bereits beschrieben, durch ihren geringen Treibstoffverbrauch aus. Diese Art von Triebwerke hat einen um 30% geringeren Treibstoffverbrauch als herkömmliche Turbofan-Triebwerke. Die CROR-Konzepte sind als Antriebe bis zu einer Flugmachzahl von 0,8 realisierbar. Damit sind sie für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge als Antrieb geeignet [1].

Ein großer Nachteil der CROR-Triebwerke ist jedoch die Lärmerzeugung. Auf Grund der hohen Blattspitzengeschwindigkeit bei hohen Drehzahlen wird deutlich mehr Lärm unkoordiniert durch die fehlende Ummantelung abgestrahlt. Daher ist bei der Betrachtung eines CROR-Antriebes neben der aerodynamischen Simulation auch immer eine akustische Analyse des Antriebes von Nöten.

## 2. DER VERSUCHSAUFBAU IM ÜBERBLICK

Bei den durchgeführten Untersuchungen saß der Antrieb während des Versuches in einem mit Luft oder gasförmigem Stickstoff kühlbaren Gehäuse innerhalb einer drucklosen Kryokammer. Zur zentralen Messwerterfassung wurde das „digital Signal Processing And Control Engineering“ System

(dSPACE System) verwendet, welches ein Echtzeit-Messsystem darstellt. Mit dem ControlDesk, einer Benutzeroberfläche von dSPACE, wird die Steuerung des Versuches ausgeführt.

Um während eines Testlaufs den Propeller zu überwachen und um Aussagen über die Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Propellerkonstellationen treffen zu können, werden verschiedene Messsensoren verwendet. Die besonders anspruchsvollen Bedingungen während eines Tests, z.B. die tiefkalte Temperatur von bis zu 100K und die Stickstoffatmosphäre, gestalten die Auswahl von Messsensoren und dessen Verwendung äußerst schwierig.

Die Aufnahme von Schub und Drehmoment wurde während der Propellertests mit einer Windkanalwaage durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine Dehnmessstreifen Windkanalwaage, welche Kräfte und Momente um alle drei Achsen messen kann.

Die Erfassung lokaler Temperaturen während der Propellertests zeigte sich als von enormer Bedeutung, da die Temperatur des Motors überwacht und kontrolliert werden musste, um einer Überhitzung mit nachfolgender Zerstörung vorzubeugen. Die Temperaturen wurden über an die Wicklungen geklebte Thermoelemente gemessen. Zusätzliche Thermoelemente in der Kryokammer erlaubten auch dort die Erfassung der Temperatur. Dies war notwendig, um die Abkühlung der Versuchskammer durch eingespeisten Stickstoff regeln und überwachen zu können.

Die in den Wicklungen des Motors produzierte Wärme wurde mit gasförmigem Stickstoff abgeführt. Der Durchfluss des Kühlmediums, der über einen Coriolissensor gemessen wurde, hatte zur Folge,

dass die Motortemperatur weniger schnell anstieg und somit das Leistungsspektrum der Motoren erhöht werden konnte. Die Kühlgastemperatur wird am Eintritt des Motors ebenfalls über ein Thermoelement aufgenommen.



**Bild 2-1** Temperaturmessung der Wicklungen

Die Drehzahl der Motoren wurde über Drehzahlsensoren aus dem Modellbaubereich gemessen. Die Steuerung der Motoren erfolgte über einen Drehzahlgeber, ebenfalls aus dem Modellbaubereich. Um die Lager der Elektromotoren zu überwachen, wurde ein Beschleunigungssensor auf dem Motor befestigt. Aus Platzgründen war es leider nicht möglich, diesen innerhalb des Motors unter zu bringen. Die elektrische Leistung der Motoren wurde über das Netzteil der Spannungs- und Stromversorgung ermittelt. Die mechanische Leistung konnte für die Einzelkonfiguration über das Drehmoment berechnet werden. Als Antriebe sind zwei unterschiedliche Motoren zum Einsatz gekommen. Zum einen ist der Robbe Roxxy BL6362/08 der Firma Robbe verwendet worden und im Bezug auf Doppelrotortests wurde der AXI Double 5330 F3A des Herstellers Modelmotors verwendet. Mit dem Robbe Motor sind Einzelrotortests durchgeführt worden. Der AXI Motor wurde verwendet um die Konstellation des CROR zu untersuchen.

Beide bürstenlosen Außenläufermotoren wurden mit Druckpropellern bestückt um Kennlinien aufzunehmen.



**Bild 2-2** Die in der Kryokammer installierte Gesamtanordnung

### 3. DIE VERSUCHS-DURCHFÜHRUNG

Die Untersuchung des Einzelpropellerantriebes brachte zunächst Schub- und Leistungskennlinien bei Temperaturen von  $T = 290K$  und  $T = 120K$  hervor, wobei als Rotor zwei Propellerblätter mit 41,2 cm Durchmesser verwendet wurde. Der Blattstellwinkel wurde für die Tests auf  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $10^\circ$  eingestellt. Der Einstellwinkel bezieht sich auf eine relative Länge des Blattes von 70% des Blatradius.

Am Einzelpropellerantrieb wurden zudem Lageruntersuchungen bei kryogenen Temperaturbedingungen ( $T = 120K$ ) durchgeführt. Es wurden zum einen entfettete Keramiklager und zum anderen entfettete Stahllager getestet. Ziel dieser Tests war es, Aussagen über die Lebensdauer und den Verschleiß des jeweiligen Lagers machen zu können und eine geeignete

Lagerausführung für folgende kryogene Doppelpropellertests zu finden. Alle Lagertests wurden bei einem Blattanstellwinkel von  $5^\circ$  durchgeführt, um die Belastung für die Lager gleich zu halten.

Die Versuche des Doppelpropellerantriebes wurden mit zwei jeweils fünfblättrigen Rotoren durchgeführt. Die Blätter beider Rotoren hatten einen Durchmesser von 22cm. Der vordere Rotor drehte gegen den Uhrzeigersinn und der hintere Rotor drehte im Uhrzeigersinn. Alle fünf Propellerblätter beider Rotoren waren auf  $15^\circ$  Blattanstellwinkel eingestellt. Um Aussagen über die Effizienz eines Doppelpropellers treffen zu können, wurde mit jeder Rotorebene eine eigene Drehzahlkennlinie aufgenommen. Dabei befand sich der jeweils andere Rotor im Stillstand. Somit ließen sich im Bezug auf die Doppelpropellerversuche generelle Aussagen über die Effektivität dieser treffen. Die oben aufgeführten Versuche fanden bei einer Kammertemperatur von  $T_{Kammer} = 296K$ , sowie bei einer Umgebungstemperatur von  $T_{Kammer} = 120K$  statt. Ebenfalls bei diesen Temperaturen wurde eine Testreihe durchgeführt, in der beide Propeller mit gleichen Drehzahlen drehten. Mit diesem Vorgehen konnte die Interaktion beider Rotoren untersucht werden. Dazu wurde zuerst der vordere Propeller auf eine konstante Drehzahl hochgefahren. In konstanten Drehzahlschritten wurde anschließend der hintere Propeller ebenfalls auf die gleiche Drehzahl beschleunigt.

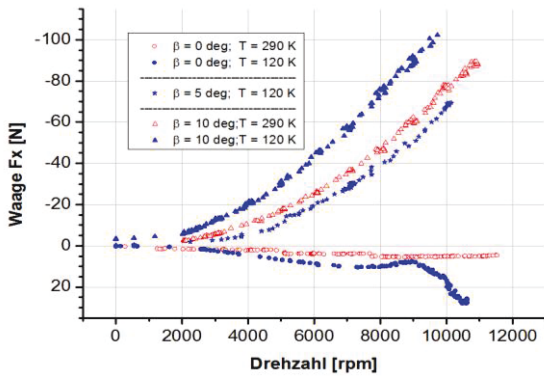
## 4. DIE VERSUCHSERGEBNISSE

### 4.1 Einzelrotorantrieb

Der von dem Propeller produzierte Schub hängt von der Umgebungsdichte und von der Einstellung der Blattwinkel ab.

In Abbildung 4-1 ist der Schubverlauf über der Drehzahl bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Blattanstellwinkeln dargestellt. Bei einem Blattanstellwinkel von  $0^\circ$  entstanden positive Schubwerte. Der Propeller „zieht“ in dieser Konstellation, da die erzeugte Schubkraft in der Propellerlängsachse gesehen nach vorne gerichtet ist. Messungen bei einem Blatteinstellwinkel von  $5^\circ$  und  $10^\circ$  erzeugen hingegen einen negativen Schubwert. In dieser Konstellation ist der Propeller ein Druckpropeller, da die erzeugte Schubkraft, in der Propellerlängsachse gesehen, nach hinten gerichtet ist. Diese gegensätzlichen Schubrichtungen bei  $0^\circ$ , bei  $5^\circ$  und  $10^\circ$  Anstellwinkel entstehen auf Grund der unterschiedlichen Umströmungsverhältnisse der Propellerblätter bei dem jeweiligen Blatteinstellwinkel. Bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  produziert die Umströmung des Propellerblattes nur wenig Schub. Bei der „Warmkurve“ der auf  $0^\circ$  eingestellten Propellerblätter kann man erkennen, dass der Propeller auf Nullschub eingestellt ist. Es ist keine typische Schubabhängigkeit von der Drehzahl zu erkennen, wie bei  $5^\circ$  oder  $10^\circ$  Anstellwinkel zu sehen. Die Schubkraft weist einen konstanten Wert von ca 5N auf.

Bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = 5^\circ$  und  $\alpha = 10^\circ$  ist die Umströmung des Propellerblattes verbessert und der Schub steigt an.



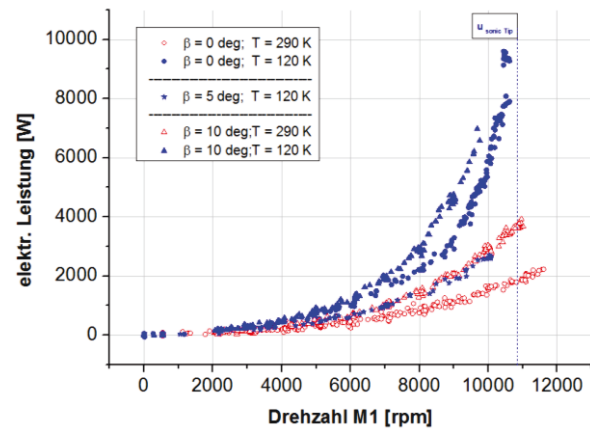
**Bild 4-1 Schubverläufe**

In Abbildung 4-1 ist ebenfalls der Dichteinfluss auf den Schub zu erkennen. Wird der Propeller in einer Atmosphäre mit höherer Dichte betrieben, wie es bei einer Temperatur von 120K der Fall ist, steigt der Schub an. Die Dichte ist ein linearer Faktor in der Schubgleichung. Somit existiert theoretisch ein linearer Faktor zwischen den Warm- und Kaltmesswerten des Schubes, welches in dem oberen Diagramm für einen Anstellwinkel von 10° im Bereich höherer Drehzahlen zu erkennen ist.

Der Versuch bei einer Kammertemperatur von  $T_{Kammer} = 120K$  und einem Blatteinstellwinkel von 0° liefert ungewöhnliche Ergebnisse. Es ist keine konstante Abhängigkeit des Schubes von der Drehzahl zu erkennen, wie es bei der Kennlinie des Propellers mit einem Anstellwinkel von 0° und einer Umgebungstemperatur von 290K der Fall war. Das ungewöhnliche ist, dass im Drehzahlbereich von 8000 RPM bis 9000 RPM der Schub zunächst abnimmt. Ab 9000 RPM steigt der Schub mit einer größeren Steigung als vorher wieder an. Die ungewöhnliche Schubverteilung über der Drehzahl kann auf aeroelastischer Probleme bei hohen Reynoldszahlen zurückgeführt werden, die durch kryogene Bedingungen erzeugt wird.

Besonders die Umströmungsverhältnisse durch den Anstellwinkel von 0° tragen dazu bei, dass die Propellerblätter sich verwinden.

In Abbildung 4-2 ist die elektrische Leistung über der Drehzahl bei den verschiedenen Testbedingungen aufgetragen. Bei einer Kammertemperatur von  $T_{Kammer} = 120K$  ist deutlich mehr elektrische Leistung nötig, um im Vergleich zu einer Kammertemperatur von  $T_{Kammer} = 290K$  mit gleichem Blatteinstellwinkel den Propeller bei einer spezifischen Drehzahl zu betreiben.



**Bild 4-2 elektrische Leistungskennlinien**

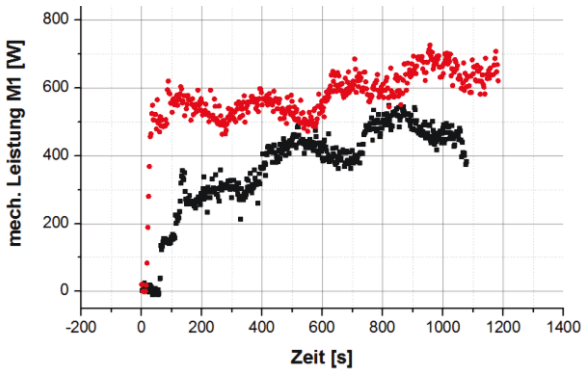
Bei kalten Temperaturen ist eine größere Leistung notwendig, weil zum einen die Dichte der Luft höher ist, andererseits die Lagerung bei tiefen Temperaturen aufgrund der sich ändernden Lagerspiele unterschiedlich ist, sodass eine unterschiedlich starke Reibung entsteht.

Die Kennlinien bei 0° und 10° Blatteinstellwinkel sind mit Keramiklager aufgenommen worden, wobei die Gummidichtung entfernt wurde, um die Lager entfetten zu können.

Die Kennlinie bei 5° Blatteinstellwinkel wurde mit beschichteten Stahllager durchgeführt.

Die letzte genannte Kennlinie liegt deutlich unter der Leistung der 0° Kennline.

Dieser Verlauf wird durch die Art der Lager hervorgerufen. Bei den beschichteten Stahllagern tritt deutlich weniger Reibung auf, weshalb die elektrische Leistung zur Erzeugung einer gewählten Drehzahl geringer ist.



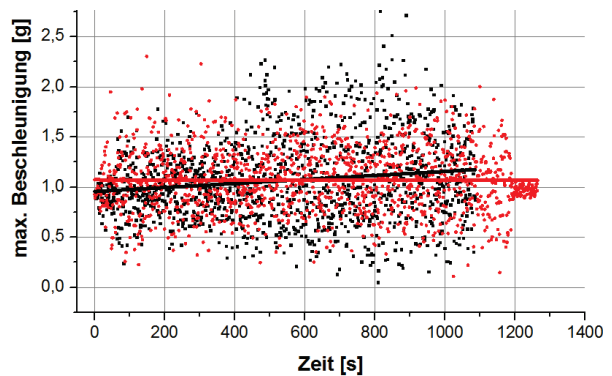
**Bild 4-3 Einfluss Lager auf mechanische Leistung**

In den folgenden Diagrammen sind zwei verschiedene Lagerungen getestet worden. Es handelt sich dabei um Keramikugellager mit Stahlkäfig in der Ausführung mit beidseitiger Gummidichtung (688 2RS/C) und Stahllager mit Stahlkäfig und einer Beschichtung in der Ausführung mit Spaltdichtung (688 ZZ). In Abbildung 4-3 ist die mechanische Leistung über der Drehzahl dargestellt. In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass mit den beschichteten Stahllagern (rote Messpunkte) mehr mechanische Leistung bei gleicher Drehzahl erzielt wird, als mit den Keramikugellagern (schwarze Messpunkte). Der Grund dafür liegt in der geringen Reibung der Stahllager. Bei den Keramiklagern ist die Reibung größer, sodass weniger mechanische Leistung aus der elektrischen Leistung erzielt wird.

Die elektrische Leistung ist in beiden Versuchen gleich groß über der Drehzahl. Das bedeutet, dass

der Wirkungsgrad bei der Verwendung von Stahlkugellagern größer ist, als bei der Verwendung von Keramikugellagern.

Die erhaltenen Vibrationen sind in Abbildung 4-4 als Trend über der Zeit dargestellt. Auch in diesem Diagramm schneidet das Stahlkugellager besser ab, als das Keramikugellager. Die Vibrationen des Stahlkugellagers zeigen einen konstanten Wert über der Versuchszeit. Die Vibrationen des Keramikugellagers nehmen mit der Zeit zu. Die zunehmende Lagerunruhe deutet auf einen Lagerverschleiß hin. Dies wurde bei dem nächsten Versuch bestätigt. Das Lager versagte im nächsten Test. Im Bezug auf die Lebensdauer der Lager, ist eine klare Aussage möglich. Das Keramiklager zeigte eine Laufzeit von ca. 18 Minuten. Das beschichtete Stahllager hingegen, kann eine Lebensdauer von ca. 4 Stunden bei gleicher Belastung, ohne Lagerschaden, aufweisen.

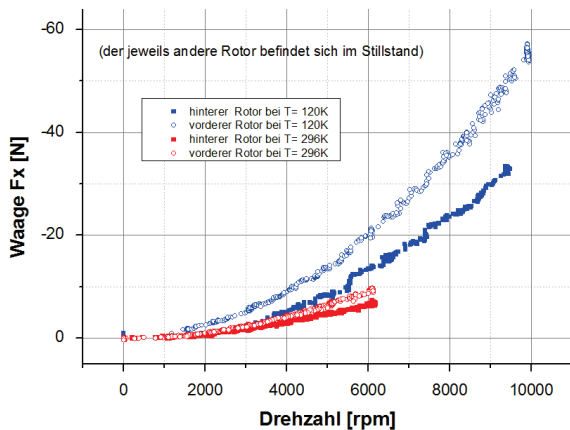


**Bild 4-4 Zeitstandsverhalten verschiedener Lagertypen**

## 4.2 Doppelrotorantrieb

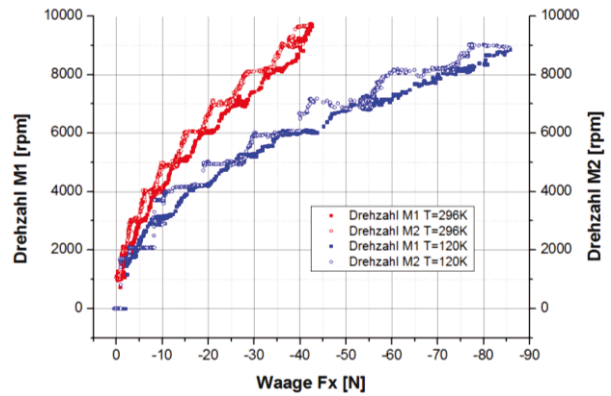
In Abbildung 4-5 ist die Schubkennlinie jedes Einzelrotors dargestellt, wobei sich die jeweils andere Rotorebene im Stillstand befindet. Es ist zu erkennen, dass der vordere Propeller bei gleicher

Drehzahl mehr Schub produziert, im Gegensatz zum hinteren Propeller. Dies ist sowohl bei einer kryogenen Temperatur, als auch bei einer Umgebungstemperatur von 296K der Fall. Der Grund für diesen Effekt liegt an der ungestörten Ansaugung des vorderen Rotors. Die Anströmung des hinteren Rotors ist nicht perfekt, da die Abströmung des vorderen Rotors diese stört. Es ist auch im unten aufgeführten Diagramm eine quadratische Abhängigkeit des Standschubes von der Drehzahl zu erkennen. Um die Effizienz des kontrarotierenden Antriebes zu beurteilen, kann zunächst die Summe des Schubes der Einzelrotorebenen bei einer Drehzahl von 7000 RPM abgelesen werden. Die vordere Rotorebene produziert bei dieser Drehzahl 30N Schub, die hintere Rotorebene produziert 18N Schub. In Summe wären dies 48N. Die physikalische Entkopplung beider Ebenen ist hier leider nicht möglich.



**Bild 4-5 Schubvergleich beider Einzelrotoren**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Doppelrotortests bei gleicher Drehzahl beider Motoren aufgetragen. Die Treppenstufen-Form dieser Kennlinien ist so zu erklären, dass zunächst die vordere Rotorebene auf eine konstante Drehzahl beschleunigt wurde.



**Bild 4-6 Schubkennlinie bei gleicher Drehzahl beider Propeller im Kryogenen**

Anschließend wurde die hintere Rotorebene ebenfalls auf diese Drehzahl eingestellt. Der Überlagerungspunkt in Y-Richtung stellt dann die Kontrarotation des Propellers bei gleicher Drehzahl dar. Bei Kontrarotation des Antriebs mit identischer Drehzahl beider Rotoren, stellt sich ein Drehmomentenausgleich ein. Dieser Effekt stellt einen Vorteil der CROR-Antriebe dar. Der Schub verdoppelt sich bei Betrieb des Antriebes im Kryogenen, im Vergleich zu einer Umgebungstemperatur von 296K. Dies liegt an der Tatsache, dass die Absenkung der Temperatur zu einer Dichtezunahme führt, welche den Schub proportional erhöht.

Bei einer Drehzahl von 7000 RPM kann ein Schub von 55N in Abbildung 4-6 abgelesen werden. Im Vergleich zu den 48N aus Abbildung 4-5 kann die Effizienz des kontrarotierenden Antriebs erkannt werden.

Hierbei nimmt die hintere Rotorebene die Energie in den Blattwirbeln der vorderen Ebene auf und setzt somit mehr Schub um.

## 5. FAZIT

Anhand der kryogenen Tests mit zwei verschiedenen Modellmotoren konnte die Funktionalität unter kryogenen Bedingungen nachgewiesen werden.

Die Datenerfassung und Messtechnik gestaltete sich während der Versuche als sehr zuverlässig.

In den Lagertests hat sich gezeigt, dass die Hybridlager nicht zur Lagerung bei diesen extremen Temperaturbedingungen geeignet sind. Die Lager hatten im Durchschnitt eine Lebensdauer von 18 Minuten aufzuweisen. Interessant ist, dass immer die vorderen Lager des Robbe Motors versagt haben. Dies kann ein Zeichen dafür sein, dass die axiale Kraftkomponente für das Lager zu groß ist. Die beschichteten Stahllager weisen eine größere Lebensdauer auf. Eine Testzeit von vier Stunden konnte absolviert werden, ohne ein Ermüden erkennen zu lassen.

Aus den Schubmessungen der Propellertests konnten einige grundlegende und interessante Verläufe gewonnen werden. Insbesondere die Untersuchung des Doppelantriebes in Kontrarotation konnte die Effizienz des Antriebes beweisen und wesentliche Erkenntnisse zum Bau eines im Windkanal zu integrierenden CROR-Antriebs liefern, was im nächsten Projektabschnitt vorgesehen ist.

## QUELLENVERZEICHNIS

[1] Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik „Counterrotating Open Rotor“, [http://www.iag.uni-stuttgart.de/arbeitsgebiete/helikopter/Open\\_Rotor.html](http://www.iag.uni-stuttgart.de/arbeitsgebiete/helikopter/Open_Rotor.html) (September 2013)