

Berichts.-Nr.: DLR-IB-AS-GO-2020-45

Verfasser: Dr. habil. A.D. Gardner

Titel: FAST-Rescue  
-  
wissenschaftlicher Ergebnisbericht

Datum: 30 April 2020

Auftraggeber: DLR Programmatik LRR

Kostenträger: 2380631

Vorgesehen für: Extern

**Der Bericht umfaßt:**

766 Seiten einschl.  
1 Tabelle  
1 Bild  
3 Literaturstellen

Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte, darf Weitergegeben.

**DLR**

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Bunsenstraße 10  
D - 37073 Göttingen**

**Abteilung Hubschrauber**





**Übersicht:**

Wissenschaftlicher Ergebnisbericht über das abgeschlossene DLR-Projekt FAST-Rescue (Fast and Silent Rescue Helicopter)

**DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT-  
UND RAUMFAHRT E.V.**

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik**

Institutsleiter:

Verfasser:

(Prof. Dr. Dr. A. Dillmann)

(Dr. habil. A.D. Gardner)

Abteilungsleiter:

(Prof. Dr. M. Raffel)

**Datum:** 30 April 2020

**Abteilung:** AS-HEL

**Bericht:**

**Bearbeitet:** A.D. Gardner

DLR-IB-AS-GO-2020-45





**FAST-Rescue – Fast and Silent Rescue Helicopter  
Januar 2016 -- März 2020**

**Wissenschaftlicher Ergebnisbericht**

von

Dr. habil. A.D. Gardner (Editor)

DLR

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Abteilung Hubschrauber  
Göttingen

Göttingen, 30. April 2020

---

1.	Ziel und Zweck des Dokumentes .....	2
2.	Einführung .....	3
3.	Publikationen .....	8
4.	Literaturliste .....	10
5.	Darstellung der Ergebnisse .....	21
6.	Referenzen .....	30
7.	Anhang A: Eingebundene Literatur .....	31
	Abbildung 2-1: Arbeitspaketstruktur FAST-Rescue .....	7
	Tabelle 3-1: Publikationsübersicht .....	8

---

## 1. Ziel und Zweck des Dokumentes

Dieses Dokument beschreibt die wissenschaftlichen Ergebnisse aller beteiligten Partner im Rahmen des DLR-Projektes FAST-Rescue (01/2016 – 03/2020). Die diesem Projekt zugrundeliegende Aufgabenbeschreibung kann dem Projektplan [1]+ [1] entnommen werden. Eine Projektbewertung erfolgt im Projektleiterbericht [2].

## 2. Einführung

Die Aerodynamik eines Hubschraubers gehört zu den komplexesten Problemen der Strömungsmechanik. Am Hauptrotor treten im Vorwärts- und Manöverflug die verschiedensten Strömungsphänomene an den Rotorblättern auf, die die aerodynamische Leistungsfähigkeit des Hubschraubers bestimmen. So führen z.B. hohe Anströmgeschwindigkeiten am vorlaufenden Rotorblatt zur Ausbildung von Überschallfeldern und Verdichtungsstößen, wohingegen es am rücklaufenden Rotorblatt infolge hoher Blattbelastung bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten teilweise zur dynamischen Strömungsablösung und zur Rückanströmung des Blattes kommt. Durch die außerordentliche Komplexität der inhärent instationären Umströmung des Rotors liegt bisher ein teilweise noch mangelhaftes Verständnis der dreidimensionalen strömungsphysikalischen Vorgänge am Rotorblatt in den verschiedenen Flugzuständen vor. Dieses erschwert die detaillierte Analyse und Bewertung der aerodynamischen Leistungsfähigkeit existierender Rotoren und verzögert dadurch die Weiterentwicklung und Verbesserung zukünftiger Rotoren. Die Komplexität des Strömungsfeldes erschwert insbesondere aber auch die numerische Vorhersage der aerodynamischen Leistung, den entstandenen Fluglärm und die Grenzen der Flugenveloppe neuer Hubschrauberhauptrotoren. Diese Vorhersage ist beim DLR bisher nicht mit zufriedenstellender Genauigkeit möglich, wird aber von Seiten der Hubschrauberindustrie nachgefragt, um die Weiterentwicklung von Hubschraubern im Sinne der Verbrauchskostenminimierung und der Verträglichkeit mit ökologischen Zielen voranzutreiben. Die größten Defizite hinsichtlich des Verständnisses der strömungsmechanischen Vorgänge und hinsichtlich des Erreichens einer guten Vorhersagegüte numerischer Verfahren werden derzeit in den Bereichen Dynamic Stall, Grenzschichttransition und Elastizität des Rotorblatts ausgemacht.

Die Entwicklung einer realitätsnahen, aber für DLR-Forschungszwecke geeigneten Hubschrauberkonfiguration ist im Rahmen des Projekts FAST-Rescue vorgesehen. Als Vorgabe für diese Konfiguration dienen das Anforderungsprofil und die Mission des im DLR Leitkonzept 4 definierten Rettungshubschraubers. Die Referenzkonfiguration wird ebenso durch das Leitkonzept 4 vorgegeben.

Der laminar/turbulente Grenzschichtumschlag, die sog. Transition, hat bei der Umströmung von Hubschraubern im Allgemeinen und bei der Umströmung des Hauptrotors im Speziellen eine überaus wichtige Bedeutung. Da laminare Strömung einen deutlich geringeren Reibungswiderstand als turbulente Strömung aufweist, setzen aktuelle und zukünftige Entwürfe von Rotorblattprofilen zur Widerstandsreduktion verstärkt auf eine Maximierung der laminaren Strömung am Blatt. Das Vorhandensein von großen Anteilen laminarer Strömung kann am Blatt darüber



hinaus aber auch nachteiligen Einfluss auf andere strömungsmechanische Phänomene (z.B. Strömungsablösung) am Rotor haben, was wiederum in einer Reduktion der aerodynamischen Leistungsfähigkeit des Rotors resultieren kann. Die im Starrflüglerbereich schon weitgehend standardmäßige Berücksichtigung von Transition im aerodynamischen Entwurf befindet sich im Bereich der Drehflügler aufgrund der inhärent instationären Strömung und der Rotationseffekte noch in einem frühen Stadium. Weder das vollständige Verständnis der Transitionseffekte am Rotor noch deren präzise Vorhersage sind derzeit möglich. Im Vorläuferprojekt SIMCOS konnten aber bereits wichtige Schritte hinsichtlich einer instationären Vorhersage der Transition gemacht werden. Die in TAU verfügbaren Transitionsverfahren wurden für zweidimensionale Strömungen um eine instationäre Vorhersagemethode erweitert, und es konnte erstmals eine instationäre Transitionsvorhersage für schwingende Rotorblattprofile für Fälle mit und ohne Dynamic Stall durchgeführt werden. Die verbesserte Vorhersagegüte dieser Methodik wurde bereits im LuFo-Projekt INROS bei der Bewertung dynamischer aerodynamischer Eigenschaften neu entwickelter Rotorblattprofile von der Industrie nachgefragt. Weiter konnte im Vorläuferprojekt STELAR eine Transitionsvorhersage-Methodik für Rotoren im Vorwärtsflug in TAU implementiert werden. Die verbesserte Vorhersagegüte dieser Methodik wurde auch bereits im LuFo-Projekt INROS und im Projekt STELAR bei der Bewertung neuer Rotoren mit vorwärts-rückwärts gepfeilten Blättern von der Industrie nachgefragt. Eine detaillierte Validierung dieser Methodik sowie ihre Anpassung und Anwendung auf dreidimensionale Rotorströmungen bis in die Grenzbereiche der Flugenveloppe war in STELAR aber noch nicht geplant und steht daher noch aus. Die experimentelle Referenzlage für Transition in rotierenden Systemen ist sehr dünn, in erster Linie aufgrund praktischer Schwierigkeiten bei solchen Messungen, und soll daher im Projekt FAST-Rescue erweitert werden. Gleichzeitig sollten diese neu gewonnenen Daten sofort zur Validierung der in STELAR implementierten Transitionsmodelle benutzt werden, um diese Methoden für die Entwicklung neuer Rotorsysteme zu reifen.

Der dynamische Strömungsabriss, der sog. Dynamic Stall, tritt auf dem hochbelasteten rücklaufenden Rotorblatt im Vorwärtsflug auf und geht mit hohen Lastspitzen in Auftrieb, Widerstand und Nickmoment am betroffenen Blatt einher. Die Nickmomentenlastspitzen können beim Auftreten von Dynamic Stall an großen Teilen des Rotorblattes zu strukturellen Schäden an Bauteilen des Rotors führen. Deswegen wird der Flugbereich im Manöverflug eingeschränkt, um eine strukturelle Schädigung des Rotors auszuschließen. Das Verständnis und die exakte numerische Simulation von Dynamic Stall sind aufgrund des Zusammenwirkens von massiver Strömungsablösung, Wirbelbildung und -ausbreitung sowie Wiederanlegen der Strömung sehr schwierig und äußerst aufwendig. Im Vorläuferprojekt SIMCOS konnten bei der Vorhersage

des zweidimensionalen Dynamic Stall aber trotzdem große Fortschritte gemacht werden, welche darüber hinaus in STELAR auf den 3D-Strömungsabriss erweitert wurden. Die Erforschung der Ursachen legte offen, dass die Rotation einen großen Einfluss auf das Dynamic Stall-Verhalten von Rotorblattprofilen hat und in der numerischen Vorhersage mitbetrachtet werden muss. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass das abgelöste Strömungsfeld deutlich komplexer ist, als es einfache Turbulenzmodellierungsansätze im DLR-TAU Code berücksichtigen können. Daher müssen hochwertige Ansätze wie z.B. das Reynolds-Spannungs-Modell zur Vorhersage eingesetzt werden. An ausgewählten Testfällen konnte mit diesen Erkenntnissen eine bis dahin unerreichte Güte der quantitativen Vorhersage der Lastspitzen erreicht werden, die auch bereits außerhalb von STELAR z.B. im LuFo-Projekt INROS bei der Bewertung dynamischer aerodynamischer Eigenschaften neu entwickelter Rotorblattprofile in Zusammenarbeit mit der Industrie eingesetzt wurden. Hinsichtlich der Dreidimensionalität von Dynamic Stall am rotierenden Rotorblatt konnten in SIMCOS lediglich erste Schritte durchgeführt werden, indem erstmalig sehr aufwendige dreidimensionale TAU-Simulationen eines isolierten generischen Rotorblattes unter Dynamic Stall-Bedingungen demonstriert werden konnten. Die Erforschung der strömungsmechanischen Zusammenhänge und die Realisierung einer guten quantitativen numerischen Vorhersage von 3D Dynamic Stall am Rotor war in SIMCOS aber noch nicht geplant und steht daher noch aus. Das Projekt FAST-Rescue soll eine neue experimentelle Datenbasis für 3D-Dynamic Stall-Testfälle aufbauen, welche zeitnah zur Validierung numerischer Aktivitäten dient, und den entscheidenden Fortschritt hin zum Verständnis und zur industriell relevanten numerischen Vorhersage von Dynamic Stall am Rotor ermöglicht.

Die Vorhersage der Lärmabstrahlung für die am Hubschrauber eingesetzten Rotorblätter und des Gesamtsystem haben entscheidenden Einfluss auf die Entscheidung, wie die aerodynamische Leistungsfähigkeit des getrimmten Fluggeräts mit Umweltzielen zu vereinbaren ist. Die dominante Lärmquelle vor allem im Hubschrauber-Sinkflug ist der Blatt-Wirbel-Interaktionslärm, der durch das Auftreffen von Blattspitzenwirbeln auf nachfolgende Hauptrotorblätter bzw. den Heckrotor erzeugt wird. Die Simulation von Hubschrauberlärm ohne eine Verfolgung der Blattspitzenwirbel hätte daher lediglich akademischen Charakter und wäre nicht zur Vorhersage geeignet. Die Strömungs-Struktur-Kopplung der Rotorblätter ist auch innerhalb der numerischen Simulation von großer Wichtigkeit, da sie die Positionierung aller Komponenten zueinander berechnet, und daher für den Abstand bzw. das Auftreffen von Wirbeln entscheidend ist. Sowohl die aerodynamische Antwort auf die instationäre Blattdeformation als auch die strukturelle Antwort auf die instationäre Aerodynamik, z.B. beim Dynamic Stall, sind hierbei sowohl wissenschaftlich als auch industriell interessant. Die Lärmquellen des Hubschraubers können

über die Druckverteilung auf der Oberfläche des Hubschraubers bzw. aus der Druckverteilung auf einer Hülle um den Hubschrauber herum berechnet und in das Fernfeld propagiert werden. Zu diesem Zweck wurde am Institut AS das Ffowcs-William-Hawkins Berechnungsverfahren APSIM entwickelt. Im Rahmen von FAST-Rescue soll eine Berechnungskette bestehend aus HOST zur Berechnung der Trimmung des Gesamthubschraubers, UPM zur Berechnung der lokalen Aerodynamik und APSIM zur Berechnung der Schallemission erstellt werden. Die Methodik soll zur Erstellung einer Lärmdatenbank genutzt werden, auf deren Basis das Überfluggeräusch der BO105 mit Hilfe des Simulationstools SELENE berechnet werden soll. Zusätzlich soll die Anbindung von APSIM an TAU zur CFD-basierten Lärmvorhersage des Gesamthubschraubers erfolgen.

Die Fähigkeit zur Bewertung der dynamischen und aeroelastischen Stabilität von einzelnen Rotorblättern und kompletten Rotorsystemen liegt im DLR nur bedingt vor. Bisher sind Flattervorhersagen, die z.B. innerhalb des STAR Konsortiums zur Bewertung von neuen Rotorblattentwürfen erforderlich gewesen sind, durch andere Projektpartner wie dem amerikanischen AFDD durchgeführt worden. Erste Schritte hin zu einer eigenen Vorhersagekapazität im DLR sind im Rahmen der Qualifizierung des Rotorteststands Göttingen (RTG) für den Einsatz der geraden Rotorblätter anhand der Kopplung des Mehrkörpersystems SIMPACK mit einem einfachen instationären Luftkraftmodell durchgeführt worden. Die anspruchsvolle und industriell relevante Bewertung von innovativen Blattformen mit Vor- und Rückpfeilung sowie die Anwendung der gekoppelten CFD-MKS Methoden, die im Vorgängerprojekt STELAR entwickelt und auf die isolierten Rotoren der 7AD- und ERATO-Konfiguration angewendet worden sind, steht aus und soll im Projekt FAST-Rescue vorangetrieben werden.

Durch die zeitgleiche Weiterentwicklung des strömungsmechanischen Verständnisses der dreidimensionalen Rotorströmung und der Methoden zur Dynamic Stall-Simulation, der Transitionsvorhersage und der Lärmvorhersage soll zum Ende des Projekts FAST-Rescue die überaus wichtige Fähigkeit erlangt werden, TAU-Simulationen eines Gesamthubschraubers mit getrimmtem elastischen Rotor unter Dynamic Stall Bedingungen inklusive Berücksichtigung der Grenzschichttransition und akkurater Lärmvorhersage durchzuführen. Zusätzlich erhält das DLR damit das notwendige Know How und die Werkzeuge, um sich im Bereich der Hubschrauber-aerodynamik gegenüber der Industrie und innerhalb der internationalen Forschungslandschaft weiter als wichtiger Partner zu positionieren. Die erzielten Ergebnisse sollen in wissenschaftlichen Publikationen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht und der erreichte Fortschritt damit international dokumentiert werden.

Das DLR-Projekt „FAST-Rescue – Fast and Silent Rescue Helicopter“ hatte eine vierjährige und dreimonatige Laufzeit von Januar 2016 bis März 2020. Die Arbeitspaketstruktur ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

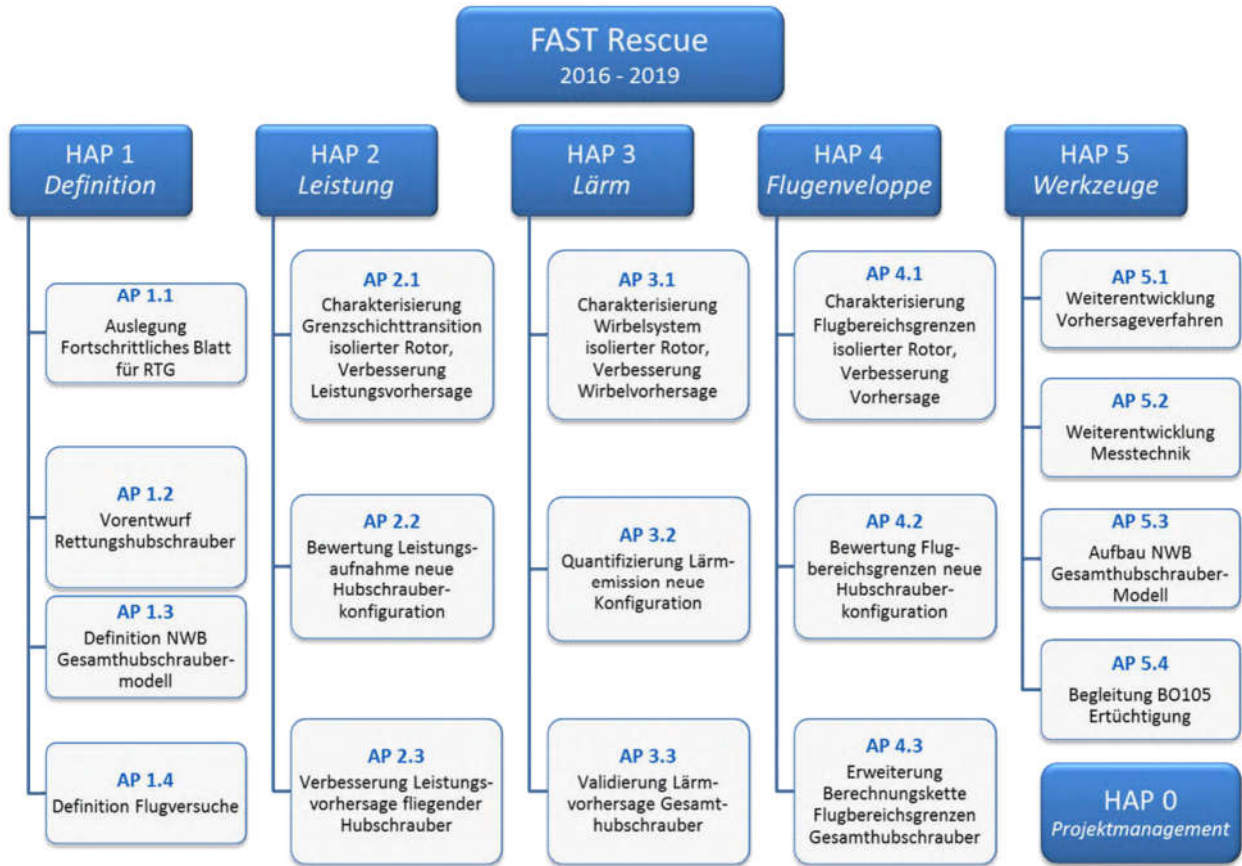


Abbildung 2-1: Arbeitspaketstruktur FAST-Rescue

### 3. Publikationen

Aus dem Projekt sind direkt oder indirekt zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen hervorgegangen. 107 wissenschaftliche Beiträge (in vier Jahren und 3 Monaten Projektlaufzeit) verdeutlichen die hohe Anzahl und Güte der in FAST-Rescue erzielten Forschungsergebnisse und die Bereitschaft der beteiligten Mitarbeiter, die erlangten Ergebnisse der Fachwelt weltweit zur Diskussion zu stellen. Darüber hinaus wurde auch eine beachtliche Anzahl an internen Berichten produziert, die Detailwissen und Dokumentationen von Messdatenbanken für das DLR festhalten. Nicht zuletzt zeigen 8 erfolgte Master- und Bachelorarbeiten, dass im Projekt auch das DLR-Ziel der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses mit großem Erfolg umgesetzt wurde. Eine zahlenmäßige Übersicht liefert Tabelle 3-1.

Wissenschaftliche Konferenzbeiträge	49	107
Wissenschaftliche Zeitschriftenbeiträge	48	
Doktorarbeiten	8	
Habilitationen	1	
Patente	1	
DLR-interne Berichte	11	19
Master- und Bachelorarbeiten	8	
DLR-Pressemitteilungen	5	

**Tabelle 3-1: Publikationsübersicht**

Die hohe Anzahl an wissenschaftlichen Fachbeiträgen sei an dieser Stelle noch einmal unterstrichen, da diese nicht nur die Quantität sondern auch die Qualität der Forschungsergebnisse des Projekts widerspiegelt. Mit den durchschnittlich 9,3 wissenschaftlichen Personaljahren pro Jahr bedeuten 107 Fachpublikationen in vier Jahren Projektlaufzeit im Detail:

- 1.2 Konferenzbeiträge pro PJ & Jahr
- 1.2 referierte Zeitschriftenbeiträge pro PJ & Jahr

Die hohe Qualität der Beiträge wird hier insbesondere durch die große Zahl an referierten wissenschaftlichen Zeitschriftenbeiträgen verdeutlicht.

Eine Übersicht aller wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist im nächsten Kapitel zu finden.

Darüber hinaus sind die sieben wissenschaftlichen Preise, die individuelle Forscher für Ihre Arbeit im Projekt gewonnen haben, gelistet.

#### Preise

- [1] DLR Wissenschaftspreis 2019:

Paper: Weiss, A., Geisler, R., Schwermer, T., Yorita, D., Henne, U., Klein, C., Raffel, M. "Single-shot pressure-sensitive paint lifetime measurements on fast rotating blades using an optimized double-shutter technique", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI: 10.1007/s00348-017-2400-4

- [2] Alfred Gessow best paper award 2019:

Paper: Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", *Vertical Flight Society 75th Annual Forum*, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.

- [3] Vertical flight society forum best aerodynamic paper 2019:

Paper: Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", *Vertical Flight Society 75th Annual Forum*, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.

- [4] ODAS Award 2019:

Paper: Weiss, A., Braukmann, J., Kaufmann, K.: "Experimental and Numerical Investigations of Unsteady Boundary-Layer Transition on a Dynamically Pitching Subscale Helicopter Rotor Blade", *19th ONERA-DLR Aerospace Symposium*, Meudon, France, June 3-5, 2019.

- [5] American helicopter society forum best aerodynamic paper 2018:

Paper: Overmeyer, A., Heineck, J. T., Wolf, C. C., "Unsteady Boundary Layer Transition Measurements on a Rotor in Forward Flight", *American Helicopter Society 74th Annual Forum*, Phoenix, May 14-17, 2018.

- [6] Best aerodynamics paper from the 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2017:

Paper: Kaufmann, K., Merz, C.B., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Simulations on a Pitching Finite Wing", *34th AIAA Applied Aerodynamics conference*, Washington, DC, June 13-17, 2016.

- [7] Hermann-Blenk Forscherpreis 2016:

Paper: Bauknecht, A., Merz, C.B., Raffel, M., "Airborne visualization of helicopter blade tip vortices", *Journal of Visualization*, 2016. DOI: 10.1007/s12650-016-0389-z



## 4. Literaturliste

Nachfolgend ist eine Übersicht aller direkt oder indirekt aus FAST-Rescue heraus entstandenen wissenschaftlichen Publikationen aufgelistet. Als Zeitraum für die Veröffentlichungen wird hier die Laufzeit des Projektes Januar 2016 bis März 2020 herangezogen, obwohl auch nach Projektabschluss eine Reihe von Publikationen erscheinen wird, die noch während der Projektlaufzeit initiiert wurde, aber erst nach Projektende abgeschlossen werden.

### Konferenzartikel

- [1] Arnold J, Waitz S. "Using Multibody Dynamics for the Stability Assessment of a New Double-Swept Rotor Blade Setup", 44th European Rotorcraft Forum, Delft, The Netherlands, September 18-21, 2018.
- [2] Arnold, J. Using Multibody Dynamics for the Flutter Assessment of an Isolated Rotor with Innovative Blade Layout. AHS Specialists' Conference on Aeromechanics Design for Vertical Lift, 20.-22. Jan. 2016, San Francisco, California, USA.
- [3] Arnold, J., "Flutter Assessment of a Rotor Blade with Innovative Layout in Hover using Indicial Aerodynamics" , American Helicopter Society 72nd Annual Forum, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [4] Arnold, J., Waitz, S., "Using multibody dynamics for the stability assessment of a new rotor test rig ", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.
- [5] Bauknecht, A., Raffel, M., Grebing, B., "Airborne Acquisition of Blade Tip Displacements and Vortices on a Coaxial Ultralight Helicopter", 2017 AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exhibition, Denver, CO, June 5-9, 2017.
- [6] Bauknecht, A., Schwarz, C., Raffel, M., Mailänder, S., "Flow Measurement Techniques for Rotor Wake Characterization on Free-Flying Helicopters in Ground Effect", AIAA Science and Technology Forum and Exposition, San Diego (CA), USA, 7-11 January 2019
- [7] Braukmann, J. N., Bauknecht, A., Wolf, C. C., Raffel, M., "Towards density reconstruction of helicopter blade tip vortices from high-speed background oriented Schlieren data", STAB 2016, Braunschweig, 8-9 November, 2016.
- [8] Braukmann, J. N., Schwermer, T., Wolf, C. C., "Investigation of young blade-tip vortices at a rotor test facility using stereoscopic PIV", Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Karlsruhe, Germany, September 5-7, 2017.
- [9] Braukmann, J.N., Wolf, C.C., Goertler, A., Raffel, M., "Blade Tip Vortex Characterization of a Rotor under Cyclic Pitch Conditions Using BOS and PIV", AIAA Science and Technology Forum and Exposition, San Diego (CA), USA, 7-11 January 2019
- [10] Gardner, A.D. "Das DLR Projekt STELAR", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, September 13-15, 2016, Braunschweig (Vortrag ohne Paper)

- 
- [11] Gardner, A.D., Merz, C.B., Wolf, C.C., "Effect of sweep on a pitching finite wing", American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [12] Gardner, A.D., Opitz, S., Wolf, C.C., Merz, C.B., "Experiment demonstrating reduction of dynamic stall by a back-flow flap", American Helicopter Society 72nd Annual Forum, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [13] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019. (Invited Paper)
- [14] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [15] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M., "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", 42nd European Rotorcraft Forum, September 6-8, 2016, Lille, France
- [16] Gleichauf, D., Dollinger, C., Balaesque, N., Gardner, A.D., Sorg, M., Fischer, A., "Contrast enhancement in thermographic flow visualization" Wind Energy Science Conference (WESC ), Cork, Ireland, 16-20 June 2019.
- [17] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Tip-Vortex Investigation on a Rotating and Pitching Rotor Blade", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.
- [18] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Raffel, M., "Blade Tip-Vortices of a Four-Bladed Rotor with Axial Inflow", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [19] Goerttler, A., Gardner, A. D., Richter, K., "Unsteady boundary layer transition detection by automated analysis of hot film data", STAB 2016, Braunschweig, 8-9 November, 2016.
- [20] Heineck, J.T., Overmeyer, A., Wolf, C., Raffel, M., "Boundary Layer Transition Visualization of a Helicopter Blade in Forward Flight Using Thermography", 18th International Symposium on Flow Visualization, Zürich, Switzerland, June 26-29, 2018.
- [21] Hoeveler, B., Wolf, C. C., Raffel, M., Janser, F., "Aerodynamic Study on Efficiency Improvement of a Wing Embedded Lifting Fan Remaining Open in Cruise Flight", AIAA Aviation 2018, Atlanta, GA, USA, June 25-29, 2018.
- [22] Kaufmann, K., Merz, C.B., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Simulations on a Pitching Finite Wing", 34th AIAA Applied Aerodynamics conference, Washington, DC, June 13-17, 2016.
- [23] Kaufmann, K., Müller, M.M., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Computations of Double-Swept Rotor Blades", STAB 2018, Darmstadt, 6-7 November, 2018.
- [24] Kaufmann, K., Ströer, P., Richez, F., Lienard, C., Gardarein, P., Krimmelbein, N., Gardner, A. D., "Validation of boundary-layer-transition computations for a rotor with ax-



- ial inflow", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [25] Kaufmann, K., Wolf, C.C., Merz, C.B, Gardner, A. D., "Numerical Investigation of Blade-Tip-Vortex Dynamics", 17th ONERA-DLR Aerospace Symposium, 7-9 June, 2017
- [26] Koch, C., Arnold, J., Schmidt, H., "Aeroelastische Untersuchung eines V-Leitwerks mit integrierten Antriebseinheiten" DLRK 2019 - Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 30. Sep. - 02. Okt. 2019, Darmstadt, Deutschland.
- [27] Letzgus, J., Gardner, A.D., Schwermer, T., Keßler, M., Krämer, E., "Numerical investigations of Dynamic Stall on a Rotor with Cyclic Pitch Control", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.
- [28] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., "Unsteady boundary layer transition detection with local infrared thermography", STAB 2018, Darmstadt, 6-7 November, 2018.
- [29] Mueller, M.M., Schwermer, T., Mai, H., Stieg, C. "Development of an innovative double-swept rotor blade tip for the rotor test facility Goettingen", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Sept 4-6, 2018.
- [30] Overmeyer, A., Heineck, J. T., Wolf, C. C., "Unsteady Boundary Layer Transition Measurements on a Rotor in Forward Flight", American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [31] Raffel, M., Gardner, A.D., Schwermer, T., Merz, C.B., Weiss, A., Braukmann, J, Wolf, C.C., Ewers, B., "Differential Infrared Thermography (DIT) for Dynamic Stall Detection", 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 04-07 July, 2016
- [32] Richez, F., Kaufmann, K., Ströer, P., Lienard, C., Gardarein, P., Krimmelbein, N., Gardner, A. D., "Assessment of boundary layer transition prediction methods for rotating blades", 19th ONERA-DLR Aerospace Symposium, Meudon, France June 3-5, 2019
- [33] Richter, K., Schülein, E., Ewers, B., Raddatz, J., Klein, A., "Boundary Layer Transition Characteristics of a Full-Scale Helicopter Rotor in Hover", American Helicopter Society 72nd Annual Forum, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [34] Richter, K., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., "Detection of Unsteady Boundary Layer Transition Using Three Experimental Methods", AIAA-2016-1072, AIAA SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego (CA), USA, 4-8 January 2016
- [35] Schwarz, C., Bauknecht, A., Mailänder, S., Raffel, M., "Wake characterization of a free-flying model helicopter in ground effect", American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [36] Schwarz, C., Bauknecht, A., Wolf, C.C., Coyle, A., Raffel, M., "A full-scale rotor-wake investigation of a free-flying helicopter in ground effect using BOS and PIV", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [37] Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Dynamic Stall Experiments on a Rotor with High Cyclic Setting in Axial Inflow", American Helicopter Society 73rd Annual Forum, Fort Worth, May 9-11, 2017.

- [38] Surrey, S., Ortun, B., Truong, K.-V., Wienke, F., "Investigation of the structural blade dynamics and aeroelastic behavior of the 7A rotor" , American Helicopter Society 72nd Annual Forum, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [39] Weiss, A., Braukmann, J., Kaufmann, K.: "Experimental and Numerical Investigations of Unsteady Boundary-Layer Transition on a Dynamically Pitching Subscale Helicopter Rotor Blade", 19th ONERA-DLR Aerospace Symposium, Meudon, France, June 3-5, 2019.
- [40] Weiss, A., Gardner, A.D., Klein, C., "Boundary-layer transition measurements on Mach-scaled helicopter rotor blades in climb", 17th ONERA-DLR Aerospace Symposium, 7-9 June, 2017
- [41] Weiss, A., Gardner, A.D., Schwermer, T., Klein, C., Raffel, M., "On the Effect of Rotational Forces on Rotor Blade Boundary-Layer Transition", AIAA SciTech 2018, 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee (FL), USA, 8-12 January 2018
- [42] Weiss, A., Geisler, R., Schwermer, T., Yorita, D., Henne, U., Klein, C., Raffel, M., "Single-shot pressure-sensitive paint lifetime measurements on fast rotating blades using an optimized double-shutter technique". 6th German-Japanese Joint Seminar (GJJS), 25.-27. Sep. 2017, Stuttgart, Deutschland.
- [43] Weiss, A., Wolf, C. C., Kaufmann, K., Braukmann, J. N., Heineck, J. T., Raffel, M.: "Unsteady Boundary-Layer Transition Measurements and Computations on a Rotating Blade Under Cyclic Pitch Conditions", 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019.
- [44] Wolf, C. C., Schwarz, C., Kaufmann, K., Gardner, A., Michaelis, D., Bosbach, J., Schanz, D., Schröder, A.: "Experimental Study of Secondary Vortex Structures in a Rotor Wake", 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019.
- [45] Wolf, C.C., Braukmann, J.N., Bauknecht, A., Raffel, M., "Elastic Main Rotor Blade Motions on Whirl Tower - Optical Measurement Technique", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Sept 4-6, 2018.
- [46] Wolf, C.C., Braukmann, J.N., Stauber, W., Schwermer, T., Raffel, M., "The Tip-Vortex System of a Four-Bladed Rotor in Dynamic Stall Conditions", American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [47] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Goertler, A., Richter, K., "Instationäre Transitionsmessung mit neuartigen Messmethoden", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, September 13-15, 2016, Braunschweig (Vortrag ohne Paper, Folien stammen aus Kai Richters AIAA-Vortrag in San Diego)
- [48] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., Opitz, S., "Influence of a Back-Flow Flap on the Dynamic Stall Flow Topology", 42nd European Rotorcraft Forum, September 6-8, 2016, Lille, France
- [49] Wolf, C.C., Mertens, C., Gardner, A.D., Dollinger, C., Fischer, A., "Optimisation of Differential Infrared Thermography for Unsteady Boundary Layer Transition Measurement", 44th European Rotorcraft Forum, Delft, September 18-20, 2018.

### Zeitschriftenartikel

- [1] Bauknecht, A., Ewers, B., Schneider, O., Raffel, M., "Blade tip vortex measurements on actively twisted rotor blades", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 5, 2017, DOI: 10.1007/s00348-017-2312-3
- [2] Bauknecht, A., Merz, C.B., Raffel, M., "Airborne visualization of helicopter blade tip vortices", *Journal of Visualization*, 2016. DOI: 10.1007/s12650-016-0389-z
- [3] Bauknecht, A., Raffel, M., Grebing, B., "Airborne Acquisition of Blade Tip Displacements and Vortices on a Coaxial Helicopter", *Journal of Aircraft*, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 1995-2007. DOI: 10.2514/1.C034647
- [4] Braukmann, J. N., Bauknecht, A., Wolf, C. C., Raffel, M., "Towards density reconstruction of helicopter blade tip vortices from high-speed background oriented Schlieren data", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XI, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 136*, 2017, pp 375-385. DOI: 10.1007/978-3-319-64519-3\_34
- [5] Gardner, A. D., Richter, K., "Transition determination on a periodic pitching airfoil using phase averaging of pressure data", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 291-301. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_26
- [6] Gardner, A. D., Wolf, C.C., Raffel, M., "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 9, 2016. DOI: 10.1007/s00348-016-2235-4
- [7] Gardner, A.D., Eder, C., Wolf, C.C., Raffel, M. "Analysis of differential infrared thermography for boundary layer transition detection", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI:10.1007/s00348-017-2405-z
- [8] Gardner, A.D., Merz, C.B., Wolf, C.C., "Effect of sweep on a pitching finite wing", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 3, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.032007
- [9] Gardner, A.D., Opitz, S., Wolf, C.C., Merz, C.B. "Reduction of dynamic stall using a back-flow flap", *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 8, No. 2, 2017. doi:10.1007/s13272-017-0237-4
- [10] Gardner, A.D., Raffel, M., Schwarz, C., Braukmann, J.N., Wolf, C.C., "Reference-free digital shadowgraphy using a moving BOS background", *Experiments in Fluids*, Vol. 61, No. 2, 2020. DOI: 10.1007/s00348-019-2865-4
- [11] Gardner, A.D., Richter, K., "Effect of the Model-Sidewall Connection for a Dynamic Stall Airfoil Experiment", *Journal of Aircraft*, 2020. DOI: 10.2514/1.C035613
- [12] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", *Journal of the American Helicopter Society*, 2020. DOI: 10.4050/JAHS.65.012002

- [13] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M., "Review of measurement techniques for unsteady helicopter rotor flows", *Progress in Aerospace Sciences*, 2019. DOI: 10.1016/j.paerosci.2019.100566
- [14] Geissler, W., "Flapping wing energy harvesting: aerodynamic aspects", *CEAS Aeronautical Journal*, 2019. DOI: 10.1007/s13272-019-00394-1
- [15] Geissler, W., van der Wall, B.G., "Dynamic stall control on flapping wing airfoils", *Aerospace science and Technology* Vol. 62, 2017. DOI: 10.1016/j.ast.2016.12.008
- [16] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Tip-Vortex Investigation on a Rotating and Pitching Rotor Blade", *Journal of Aircraft*, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 1792-1804. DOI: 10.2514/1.C034693
- [17] Goerttler, A., Gardner, A. D., Richter, K., "Unsteady boundary layer transition detection by automated analysis of hot film data", ", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XI, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 136*, 2017, pp 387-396. DOI: 10.1007/978-3-319-64519-3\_35
- [18] Heister, C. C., "A Method for Approximate Prediction of Laminar–Turbulent Transition on Helicopter Rotors", *Journal of the American Helicopter Society*, Volume 63, Number 3, July 2018, pp. 1-14(14)
- [19] Kaufmann, K., Gardner, A. D., Costes, M., "Comparison between two-dimensional and three-dimensional dynamic stall", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 315-325. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_28
- [20] Kaufmann, K., Merz, C.B, Gardner, A.D., "Dynamic Stall Simulations on a Pitching Finite Wing", *Journal of Aircraft*, Vol. 54, No. 4, pp. 1303-1316, 2017, DOI: 10.2514/1.C034020
- [21] Kaufmann, K., Müller, M.M., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Computations of Double-Swept Rotor Blades", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 142*, 2020, pp 351-361. DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_34
- [22] Kaufmann, K., Wolf, C.C., Merz, C.B, Gardner, A. D., "Numerical investigation of blade-tip-vortex dynamics", *CEAS Aeronautical Journal*, Volume 9, Issue 1, pp 373–386, 2018. DOI: 10.1007/s13272-018-0287-2
- [23] Letzgus, J., Gardner, A.D., Schwermer, T., Keßler, M., Krämer, E., "Numerical investigations of Dynamic Stall on a Rotor with Cyclic Pitch Control", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012007
- [24] Lütke, B., Nuhn, J., Govers, Y., Schmidt, M., "Design of a rotor blade tip for the investigation of dynamic stall in the transonic wind-tunnel Göttingen", *The Aeronautical Journal*, Vol. 120, No. 1232, pp1509-1533, 2016 DOI: 10.1017/aer.2016.74
- [25] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., "Unsteady boundary layer transition detection with local infrared thermography", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid*

- Mechanics XII, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 142, 2019, pp 382-391. DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_37
- [26] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Schrijer, F.F.J., van Oudheusden, B.W., "Advanced infrared thermography data analysis for unsteady boundary layer transition detection", *Measurement Science and Technology*, Vol. 31, No. 1, 2020. DOI: 10.1088/1361-6501/ab3ae2
- [27] Merz, C.B., Wolf, C.C., Richter, K., Kaufmann, K., Mielke, A., Raffel, M., "Spanwise Differences in Static and Dynamic Stall on a Pitching Rotor Blade Tip Model", *Journal of the American Helicopter Society*, Volume 62, Number 1, 2017. DOI: 10.4050/JAHS.62.012002
- [28] Merz, C.B., Wolf, C.C., Richter, K., Kaufmann, K., Raffel, M., "Experimental Investigation of Dynamic Stall on a Pitching Rotor Blade Tip", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 339-348. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_30
- [29] Olsman, W.F.V., "Method for the Extraction of Helicopter Main and Tail Rotor Noise", *Journal of Aircraft*, 2017, DOI:10.2514/1.C034525
- [30] Raffel, M., Bauknecht, A., Ramasamy, M., Yamauchi, G.K., Heineck, J.T., Jenkins, L.N., "Contributions of Particle Image Velocimetry to Helicopter Aerodynamics", *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 9, 2017. DOI:10.2514/1.J055571
- [31] Raffel, M., Gardner, A.D., Schwermer, T., Merz, C.B., Weiss, A., Braukmann, J, Wolf, C.C., "Rotating Blade Stall Maps Measured by Differential Infrared Thermography", *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 5, 2017. doi:10.2514/1.J055452
- [32] Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C.J., Wereley, S.T., Kompenhans, J. "Particle Image Velocimetry: A Practical Guide", 3rd Edition, Springer, 2018. ISBN 978-3-319-68852-7
- [33] Schwarz, C., Bauknecht, A., Mailänder, S., Raffel, M., "Wake characterization of a free-flying model helicopter in ground effect", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012010
- [34] Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "A novel experiment to understand the dynamic stall phenomenon in rotor axial flight", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012004
- [35] Schwermer, T., Richter, K., Raffel, M., "Development of a Rotor Test Facility for the Investigation of Dynamic Stall", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 663-673. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_58
- [36] Stadler, H., Bauknecht, A., Siegrist, S., Flesch, R., Wolf, C. C., van Hinsberg, N., Jacobs, M., "Background-oriented schlieren imaging of flow around a circular cylinder at low Mach numbers", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI 10.1007/s00348-017-2398-7



- [37] Weiland, P., Michelis, S., Gardner, A.D., "Numerical Simulation of an Adaptive Wall in a Virtual Transonic Wind Tunnel", *AIAA Journal*, Vol. 55, no. 9, 2017. DOI: 10.2514/1.J055481
- [38] Weiss, A., Gardner, A.D., Klein, C., "Boundary-layer transition measurements on Mach-scaled helicopter rotor blades in climb", *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 8, No. 4, 2017. DOI: 10.1007/s13272-017-0263-2
- [39] Weiss, A., Gardner, A.D., Schwermer, T., Klein, C., Raffel, M., "On the Effect of Rotational Forces on Rotor Blade Boundary-Layer Transition", *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 1, 2019. DOI: 10.2514/1.J057036
- [40] Weiss, A., Geisler, R., Schwermer, T., Yorita, D., Henne, U., Klein, C., Raffel, M. "Single-shot pressure-sensitive paint lifetime measurements on fast rotating blades using an optimized double-shutter technique", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI: 10.1007/s00348-017-2400-4
- [41] Weiss, A., Wolf, C. C., Kaufmann, K., Braukmann, J. N., Heineck, J. T., Raffel, M.: "Unsteady Boundary-Layer Transition Measurements and Computations on a Rotating Blade Under Cyclic Pitch Conditions", *Experiments in Fluids*, Vol. 61, No. 2, 2020. DOI: 10.1007/s00348-020-2899-7
- [42] Wolf, C. C., Braukmann, J. N., Stauber, W., Schwermer, T., Raffel, M., "The Tip Vortex System of a Four-Bladed Rotor in Dynamic Stall Conditions", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 2, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.022005
- [43] Wolf, C. C., Mertens, C., Gardner, A. D., Dollinger, C., Fischer, A., "Optimization of differential infrared thermography for unsteady boundary layer transition measurement", *Experiments in Fluids*, Vol. 60:19, 2019. DOI: 10.1007/s00348-018-2667-0
- [44] Wolf, C. C., Schwarz, C., Kaufmann, K., Gardner, A., Michaelis, D., Bosbach, J., Schanz, D., Schröder, A.: "Experimental Study of Secondary Vortex Structures in a Rotor Wake", *Experiments in Fluids*, Vol. 60, No. 11, 2019. DOI: 10.1007/s00348-019-2807-1
- [45] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., Opitz, S., "Influence of a Back-Flow Flap on the Dynamic Stall Flow Topology", *CEAS Aeronautical Journal*, Volume 9, Issue 1, pp 39–51, 2018. DOI: 10.1007/s13272-017-0274-z
- [46] Wolf, C.C., Merz, C.B., Richter, K., Raffel, M., "Tip-Vortex Dynamics of a Pitching Rotor Blade Tip Model", *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 10, pp. 2947-2960, 2016. DOI: 10.2514/1.J054656
- [47] Yin, J., "Investigation of Rotor Noise Shielding Effects by the Helicopter Fuselage in Forward Flight", *Journal of Aircraft*, Vol. 56, No. 4, 2019. DOI: 10.2514/1.C035009

### Doktorarbeiten

- [1] Bauknecht, A. "Characterization of blade tip vortices on large-scale rotors", Doctoral Thesis, Leibniz University Hannover, 2016
- [2] Heister, C.C., Methodik zur näherungsweise Vorhersage des laminar-turbulenten Umschlags an Hubschrauberrotoren. Dissertation. DLR-Forschungsbericht, DLR-FB-2016-37, 146 S., 2016.
- [3] Kaufmann, K. "Numerische Untersuchung des dreidimensionalen dynamischen Strömungsabrisses an einer Blattspitze", Doktorarbeit, Leibniz University Hannover, 2017
- [4] Lütke, Benjamin (2017) Dynamic Stall on a Pitching Double-Swept Rotor Blade Tip. Dissertation, Technische Universität München.
- [5] Merz, C.B. "Der dreidimensionale dynamische Strömungsabriss an einer schwingenden Rotorblattspitze", Doktorarbeit, Leibniz University Hannover, 2016
- [6] Schwermer, T. "Experimentelle Untersuchung des dynamischen Strömungsabrisses an einem Rotor mit axialer Zuströmung", Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2018
- [7] Surrey, Stefan "Helicopter Rotor Loads Prediction and Validation Based on a Fully Non-linear Aeroelastic Method", Dissertation. DLR-FB-2017-12, 2017.
- [8] Weiss, A., "Investigations of boundary-layer transition and airloads on rotating blades", Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2018

### Habilitation

- [1] Gardner, A.D., "Investigations of dynamic stall and dynamic stall control on helicopter airfoils", Habilitation Thesis, University of Clausthal, Institute of Technical Mechanics, DLR-FB-2016-55, 2016.

### Patent

- [1] Raffel, K., Richter, K., Gardner, A.D., Fechtner, F. "Hubschrauberkonfiguration für Hubschrauber mit starrem Horizontalrotor", Deutsches Patent, DE 10 2015 107 913 A1, 24 November 2016.

### DLR Berichte

- [1] Gardner, A.D., Kaufmann, K., Richter, K., "Investigation of three-dimensional Dynamic Stall", High Performance Computing in Science and Engineering, Garching/Munich, 2016.
- [2] Gardner, A.D., von der Wall, B.G., "Computation of reference polars for the SABRE chord extension project", DLR Internal Report DLR-IB-AS-GO-2018-19, 15pp, 2018.
- [3] Merz, C.B., "Dynamic Stall Investigations on the Pitching DSA-9A Rotor Blade Tip Model in the SWG - Test Campaign 2015", DLR IB 224-2015 A116, 116 Pages, 2016.
- [4] Mielke, A., Merz, C.B., "Experimentelle Untersuchungen der Strömung an einem Rotorblatt", DLR IB 224-2015 A117, 115 Pages, 2016.

- 
- [5] Olsman, W.F.J., "FASTrescue deliverable D3.3c: PAVE database", DLR Internal Report, 2017
  - [6] Olsman, W.F.J., "FASTrescue Deliverable D3.3e: Bericht zur vollnumerischen Vorhersage von Hubschrauber-Uberflüglärm und Vergleich zu experimentellen Daten", DLR Internal Report, 2020
  - [7] Schneider, O. "Fast Rescue D1.3c: Anforderungen und Spezifikationen des NWB-Modells und Abschätzung von Gesamtkosten und Aufwand", DLR Internal Report, 2016
  - [8] Schwermer, T., "Hubschrauber-aerodynamik - Dreidimensionaler Strömungsabriss im rotierenden System", Beitrag zur mobiles2016 (Fachzeitschrift für Konstrukteure: <http://www.mobiles.de>)
  - [9] Weiland, P., "Meilensteinbericht 1.2a: Vorentwurf der zwei neuen Hubschrauberkonfigurationen", DLR Internal Report, 2020
  - [10] Wolf, C.C., "CHARME: Blade Deformation Measurements using Stereo Pattern Recognition", DLR EB 224-2017 C 19, 45 Seiten, 2017.
  - [11] Wolf, C.C., "ECO-HC2 Wind Tunnel Tests", DLR EB 224-2016 C 6, 48 Seiten, 2016.

#### Bachelor- und Masterarbeiten

- [1] Blanke, J., "Aerodynamische Untersuchung des Wirbelnachlaufs eines Hubschrauberrotors mit einem Panel Verfahren", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Oktober 2018.
- [2] Domogalla, V., "Quantitative Erfassung von Wirbeln durch Impfpartikel und bildgebende Messtechniken", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, September 2019.
- [3] Eder, C., "Analyse der Differenzinfrarotthermographie", Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, August 2016.
- [4] Hartje, L.P., "Untersuchung des Einflusses der Particle Image Velocimetry auf die Charakterisierung von Blattspitzenwirbeln", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Oktober 2018.
- [5] Koch, C., "Aeroelastische Untersuchung eines V-Leitwerks mit integrierten Antriebseinheiten", Masterarbeit, RWTH Aachen, April 2019.
- [6] Mertens, C., "Unsteady Boundary Layer Transition Measurements with Infrared Thermography: Development of Improved Measurement Schemes", Master of Science, Delft University of Technology, 2018
- [7] Siwczak, N., "Untersuchung von innovativen Helikopterkonfigurationen am Modellversuch", Bachelorarbeit, TFD, Universität Hannover, April 2016
- [8] Stauber, W., "Evaluation of the tip vortex flowfield at the Rotor Test Facility Göttingen", Masterarbeit, University Göttingen, May 2018.



---

### Pressemitteilungen

- [1] „DLR-Flugversuche mit dem Forschungshubschrauber Bo 105“ 21 Juli 2017:  
[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10254/364\\_read-23410](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10254/364_read-23410)
- [2] „DLR-Flugversuche mit dem Forschungshubschrauber Bo 105“ 23 Juni 2017:  
[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10275/380\\_read-22969](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10275/380_read-22969)
- [3] „DLR-Flugversuche mit dem Forschungshubschrauber Bo 105“ 29 September 2017:  
[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10254/364\\_read-24443](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10254/364_read-24443)
- [4] „DLR-Tests bestätigen Otto Lilienthal als Ahnherrn aller Flieger“ 2 Juni 2017:  
[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10275/380\\_read-18075](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10275/380_read-18075)
- [5] „DLR unternimmt Flugversuche mit zwei Hubschraubern“, Freitag, 15. Juni 2018 :  
[https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180615\\_dlr-unternimmt-flugversuche-mit-zwei-hubschraubern\\_28427.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180615_dlr-unternimmt-flugversuche-mit-zwei-hubschraubern_28427.html)

## 5. Darstellung der Ergebnisse

Nachfolgend sollen die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse des Projekts dargestellt werden. Da diese in der Regel bereits auf wissenschaftlichen Konferenzen oder in Fachzeitschriften veröffentlicht wurden, wird in diesem Dokument für jedes Arbeitspaket eine Übersicht der Publikationen dargestellt und jeweils ausgewählte Veröffentlichungen am Ende des Dokuments als „Anhang A: Eingebundene Literatur“ vollständig eingebunden. Als Zeitraum für die Veröffentlichungen wird die Laufzeit des Projektes Januar 2016 bis März 2020 herangezogen. Artikel, die eingebunden werden, sind in grüner Farbe dargestellt

### AP 0: Projektleitung

In diesem Arbeitspaket werden die Veröffentlichungen angeordnet, die zur Übersicht gehören, oder die für Nacharbeiten zur Dynamic Stall Kontrolle mit der Rückstromklappe dienen. Diese Thema aus der Vorgängerprojekt STELAR wurde größtenteils darin abgeschlossen, aber die Dokumentationsarbeit und ein Teil der Datenauswertung fand in FAST-Rescue statt.

#### Übersichtsartikel:

- [1] Gardner, A.D. "Das DLR Projekt STELAR", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, September 13-15, 2016, Braunschweig (Vortrag ohne Paper)
- [2] Gardner, A.D., "Investigations of dynamic stall and dynamic stall control on helicopter airfoils", Habilitation Thesis, University of Clausthal, Institute of Technical Mechanics, DLR-FB-2016-55, 2016.
- [3] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M., "Review of measurement techniques for unsteady helicopter rotor flows", *Progress in Aerospace Sciences*, 2019. DOI: [10.1016/j.paerosci.2019.100566](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100566)
- [4] Raffel, M., Bauknecht, A., Ramasamy, M., Yamauchi, G.K., Heineck, J.T., Jenkins, L.N., "Contributions of Particle Image Velocimetry to Helicopter Aerodynamics", *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 9, 2017. DOI: [10.2514/1.J055571](https://doi.org/10.2514/1.J055571)
- [5] Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C.J., Wereley, S.T., Kompenhans, J. "Particle Image Velocimetry: A Practical Guide", 3rd Edition, Springer, 2018. ISBN 978-3-319-68852-7

#### Back-flow Flap, Thema aus STELAR:

- [6] Gardner, A.D., Opitz, S., Wolf, C.C., Merz, C.B. "Reduction of dynamic stall using a back-flow flap", *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 8, No. 2, 2017. doi: [10.1007/s13272-017-0237-4](https://doi.org/10.1007/s13272-017-0237-4)
- [7] Gardner, A.D., Opitz, S., Wolf, C.C., Merz, C.B., "Experiment demonstrating reduction of dynamic stall by a back-flow flap", American Helicopter Society 72nd Annual Forum, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [8] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., Opitz, S., "Influence of a Back-Flow Flap on the Dynamic Stall Flow Topology", 42nd European Rotorcraft Forum, September 6-8, 2016, Lille, France
- [9] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., Opitz, S., "Influence of a Back-Flow Flap on the Dynamic Stall Flow Topology", *CEAS Aeronautical Journal*, Volume 9, Issue 1, pp 39–51, 2018. DOI: [10.1007/s13272-017-0274-z](https://doi.org/10.1007/s13272-017-0274-z)

### AP 1: Definition

In diesem Arbeitspaket gab es wenige Veröffentlichungen, da die Arbeitspakete der Organisation und Definition der nachfolgenden Arbeitspakete dienten.

- [1] Schneider, O. "Fast Rescue D1.3c: Anforderungen und Spezifikationen des NWB-Modells und Abschätzung von Gesamtkosten und Aufwand", DLR Internal Report, 2016
- [2] Weiland, P., "Meilensteinbericht 1.2a: Vorentwurf der zwei neuen Hubschrauberkonfigurationen", DLR Internal Report, 2020

## AP 2.1 Charakterisierung Grenzschichttransition am isolierten Rotor und Verbesserung Leistungsvorhersage

Dieses Arbeitspaket liefert Veröffentlichungen zur Grenzschichttransitionsmessungen an einem modellskalierten Rotor. Das betrifft Messungen am RTG mit und ohne zyklische Steuerung, und die dazugehörigen Rechnungen. Es betrifft auch Messungen am Airbus Helicopter Whirltower und am PSP Rotor der NASA. Folgende Preise wurden dadurch gewonnen:

- [1] DLR Wissenschaftspreis 2019
- [2] ODAS Award 2019
- [3] American helicopter society forum best aerodynamic paper 2018

- [1] Heister, C. C., "A Method for Approximate Prediction of Laminar–Turbulent Transition on Helicopter Rotors", *Journal of the American Helicopter Society*, Volume 63, Number 3, July 2018, pp. 1-14(14)
- [2] Heister, C.C., Methodik zur näherungsweise Vorhersage des laminar-turbulenten Umschlags an Hubschrauberrotoren. Dissertation. DLR-Forschungsbericht, DLR-FB-2016-37, 146 S., 2016.
- [3] Kaufmann, K., Ströer, P., Richez, F., Lienard, C., Gardarein, P., Krimmelbein, N., Gardner, A. D., "Validation of boundary-layer-transition computations for a rotor with axial inflow", *Vertical Flight Society 75th Annual Forum*, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [4] Overmeyer, A., Heineck, J. T., Wolf, C. C., "Unsteady Boundary Layer Transition Measurements on a Rotor in Forward Flight", *American Helicopter Society 74th Annual Forum*, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [5] Richez, F., Kaufmann, K., Ströer, P., Lienard, C., Gardarein, P., Krimmelbein, N., Gardner, A. D., "Assessment of boundary layer transition prediction methods for rotating blades", *19th ONERA-DLR Aerospace Symposium*, Meudon, France June 3-5, 2019
- [6] Richter, K., Schüle, E., Ewers, B., Raddatz, J., Klein, A., "Boundary Layer Transition Characteristics of a Full-Scale Helicopter Rotor in Hover", *American Helicopter Society 72nd Annual Forum*, West Palm Beach, May 17-19, 2016.
- [7] Weiss, A., "Investigations of boundary-layer transition and airloads on rotating blades", Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2018
- [8] Weiss, A., Braukmann, J., Kaufmann, K.: "Experimental and Numerical Investigations of Unsteady Boundary-Layer Transition on a Dynamically Pitching Subscale Helicopter Rotor Blade", *19th ONERA-DLR Aerospace Symposium*, Meudon, France, June 3-5, 2019.
- [9] Weiss, A., Gardner, A.D., Klein, C., "Boundary-layer transition measurements on Mach-scaled helicopter rotor blades in climb", *17th ONERA-DLR Aerospace Symposium*, 7-9 June, 2017
- [10] Weiss, A., Gardner, A.D., Klein, C., "Boundary-layer transition measurements on Mach-scaled helicopter rotor blades in climb", *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 8, No. 4, 2017. DOI: 10.1007/s13272-017-0263-2
- [11] Weiss, A., Gardner, A.D., Schwermer, T., Klein, C., Raffel, M., "On the Effect of Rotational Forces on Rotor Blade Boundary-Layer Transition", *AIAA SciTech 2018*, 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee (FL), USA, 8-12 January 2018
- [12] Weiss, A., Gardner, A.D., Schwermer, T., Klein, C., Raffel, M., "On the Effect of Rotational Forces on Rotor Blade Boundary-Layer Transition", *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 1, 2019. DOI: 10.2514/1.J057036
- [13] Weiss, A., Geisler, R., Schwermer, T., Yorita, D., Henne, U., Klein, C., Raffel, M., "Single-shot pressure-sensitive paint lifetime measurements on fast rotating blades using an optimized double-shutter technique". *6th German-Japanese Joint Seminar (GJJS)*, 25.-27. Sep. 2017, Stuttgart, Deutschland.
- [14] Weiss, A., Geisler, R., Schwermer, T., Yorita, D., Henne, U., Klein, C., Raffel, M. "Single-shot pressure-sensitive paint lifetime measurements on fast rotating blades using an optimized double-shutter technique", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI: 10.1007/s00348-017-2400-4
- [15] Weiss, A., Wolf, C. C., Kaufmann, K., Braukmann, J. N., Heineck, J. T., Raffel, M.: "Unsteady Boundary-Layer Transition Measurements and Computations on a Rotating Blade Under Cyclic Pitch Conditions", *45th European Rotorcraft Forum*, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019.
- [16] Weiss, A., Wolf, C. C., Kaufmann, K., Braukmann, J. N., Heineck, J. T., Raffel, M.: "Unsteady Boundary-Layer Transition Measurements and Computations on a Rotating Blade Under Cyclic Pitch Conditions", *Experiments in Fluids*, Vol. 61, No. 2, 2020. DOI: 10.1007/s00348-020-2899-7

## AP 2.2: Bewertung Leistungsaufnahme neue Hubschrauberkonfiguration

In diesem Arbeitspaket gibt es keine Veröffentlichungen, da die Messung im NWB nicht stattgefunden haben.

### AP 2.3: Verbesserung Leistungsvorhersage des fliegenden Hubschraubers

Obwohl es keine neuen Flugexperimente zu Lärm in FAST-Rescue gab, waren trotzdem maßgebliche Arbeiten mit der Auswertung und Bereitstellung der PAVE Flugexperimentdatenbasis möglich gewesen. Da die NWB-Experimente nicht stattgefunden haben, sind aus diesem Bereich keine Veröffentlichungen vorhanden.

- [1] Olsman, W.F.J., "FASTrescue deliverable D3.3c: PAVE database", DLR Internal Report, 2017
- [2] Olsman, W.F.J., "Method for the Extraction of Helicopter Main and Tail Rotor Noise", *Journal of Aircraft*, 2017, DOI:10.2514/1.C034525

### 3.1: Charakterisierung Wirbelsystem am isolierten Rotor und Verbesserung Wirbelvorhersage

In diesem Arbeitspaket gibt es Veröffentlichungen zur Blattspitzenwirbelentstehung an einem modellskalierten Rotor. Das betrifft Messungen an Rotorversuchsständen in Modellskala mit und ohne zyklische Steuerung, und die dazugehörigen Rechnungen. Es betrifft auch Messungen an der nickenden Blattspitze und Flugexperimente mit einem Modellhubschrauber und mit dem BO105 Hubschrauber. Folgende Preise wurden dadurch gewonnen:

- [1] Hermann-Blenk Forscherpreis 2016

#### Rotorversuchsstände in Modellskala:

- [1] Bauknecht, A. "Characterization of blade tip vortices on large-scale rotors", Doctoral Thesis, Leibnitz University Hannover, 2016
- [2] Bauknecht, A., Ewers, B., Schneider, O., Raffel, M., "Blade tip vortex measurements on actively twisted rotor blades", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 5, 2017, DOI: 10.1007/s00348-017-2312-3
- [3] Braukmann, J. N., Bauknecht, A., Wolf, C. C., Raffel, M., "Towards density reconstruction of helicopter blade tip vortices from high-speed background oriented Schlieren data", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XI, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 136*, 2017, pp 375-385. DOI: 10.1007/978-3-319-64519-3\_34
- [4] Braukmann, J. N., Bauknecht, A., Wolf, C. C., Raffel, M., "Towards density reconstruction of helicopter blade tip vortices from high-speed background oriented Schlieren data", STAB 2016, Braunschweig, 8-9 November, 2016.
- [5] Braukmann, J. N., Schwermer, T., Wolf, C. C., "Investigation of young blade-tip vortices at a rotor test facility using stereoscopic PIV", Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Karlsruhe, Germany, September 5-7, 2017.
- [6] Braukmann, J.N., Wolf, C.C., Goerttler, A., Raffel, M., "Blade Tip Vortex Characterization of a Rotor under Cyclic Pitch Conditions Using BOS and PIV", *AIAA Science and Technology Forum and Exposition*, San Diego (CA), USA, 7-11 January 2019
- [7] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Tip-Vortex Investigation on a Rotating and Pitching Rotor Blade", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.
- [8] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Tip-Vortex Investigation on a Rotating and Pitching Rotor Blade", *Journal of Aircraft*, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 1792-1804. DOI: 10.2514/1.C034693
- [9] Goerttler, A., Braukmann, J.N., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Raffel, M., "Blade Tip-Vortices of a Four-Bladed Rotor with Axial Inflow", *Vertical Flight Society 75th Annual Forum*, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [10] Kaufmann, K., Wolf, C.C., Merz, C.B., Gardner, A. D., "Numerical Investigation of Blade-Tip-Vortex Dynamics", 17th ONERA-DLR Aerospace Symposium, 7-9 June, 2017
- [11] Wolf, C. C., Braukmann, J. N., Stauber, W., Schwermer, T., Raffel, M., "The Tip Vortex System of a Four-Bladed Rotor in Dynamic Stall Conditions", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 2, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.022005
- [12] Wolf, C. C., Schwarz, C., Kaufmann, K., Gardner, A., Michaelis, D., Bosbach, J., Schanz, D., Schröder, A.: "Experimental Study of Secondary Vortex Structures in a Rotor Wake", *Experiments in Fluids*, Vol. 60, No. 11, 2019. DOI: 10.1007/s00348-019-2807-1
- [13] Wolf, C. C., Schwarz, C., Kaufmann, K., Gardner, A., Michaelis, D., Bosbach, J., Schanz, D., Schröder, A.: "Experimental Study of Secondary Vortex Structures in a Rotor Wake", 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019.
- [14] Wolf, C.C., Braukmann, J.N., Stauber, W., Schwermer, T., Raffel, M., "The Tip-Vortex System of a Four-Bladed Rotor in Dynamic Stall Conditions", *American Helicopter Society 74th Annual Forum*, Phoenix, May 14-17, 2018.

### **Nickende Blattspitze:**

- [15] Kaufmann, K., Wolf, C.C., Merz, C.B., Gardner, A. D., "Numerical investigation of blade-tip-vortex dynamics", CEAS Aeronautical Journal, Volume 9, Issue 1, pp 373–386, 2018. DOI: 10.1007/s13272-018-0287-2
- [16] Wolf, C.C., Merz, C.B., Richter, K., Raffel, M., "Tip-Vortex Dynamics of a Pitching Rotor Blade Tip Model", AIAA Journal, Vol. 54, No. 10, pp. 2947-2960, 2016. DOI: 10.2514/1.J054656

### **Flugexperimente:**

- [17] Bauknecht, A., Merz, C.B., Raffel, M., "Airborne visualization of helicopter blade tip vortices", Journal of Visualization, 2016. DOI: 10.1007/s12650-016-0389-z
- [18] Bauknecht, A., Raffel, M., Grebing, B., "Airborne Acquisition of Blade Tip Displacements and Vortices on a Coaxial Helicopter", Journal of Aircraft, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 1995-2007. DOI: 10.2514/1.C034647
- [19] Bauknecht, A., Raffel, M., Grebing, B., "Airborne Acquisition of Blade Tip Displacements and Vortices on a Coaxial Ultralight Helicopter", 2017 AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exhibition, Denver, CO, June 5-9, 2017.
- [20] Bauknecht, A., Schwarz, C., Raffel, M., Mailänder, S., "Flow Measurement Techniques for Rotor Wake Characterization on Free-Flying Helicopters in Ground Effect", AIAA Science and Technology Forum and Exposition, San Diego (CA), USA, 7-11 January 2019
- [21] Schwarz, C., Bauknecht, A., Mailänder, S., Raffel, M., "Wake characterization of a free-flying model helicopter in ground effect", American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, May 14-17, 2018.
- [22] Schwarz, C., Bauknecht, A., Mailänder, S., Raffel, M., "Wake characterization of a free-flying model helicopter in ground effect", Journal of the American Helicopter Society, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012010
- [23] Schwarz, C., Bauknecht, A., Wolf, C.C., Coyle, A., Raffel, M., "A full-scale rotor-wake investigation of a free-flying helicopter in ground effect using BOS and PIV", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.

### **AP 3.2: Quantifizierung Lärmemission neue Konfiguration**

Dieses Arbeitspaket liefert keine Veröffentlichungen, da die Messung im NWB nicht stattgefunden hat.

### **AP 3.3: Validierung Lärmvorhersage Gesamthubschrauber**

In diesem Arbeitspaket gibt es Veröffentlichungen zur Validierung der aeroakustischen Berechnungskette anhand der PAVE Datenbank, und zur Rotor-Deformationsmessung im Flug (und am Whirltower). Da die Flugexperimente nicht stattgefunden haben, sind aus diesem Bereich keine Veröffentlichungen vorhanden.

- [1] Bauknecht, A., Raffel, M., Grebing, B., "Airborne Acquisition of Blade Tip Displacements and Vortices on a Coaxial Helicopter", Journal of Aircraft, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 1995-2007. DOI: 10.2514/1.C034647
- [2] Olsman, W.F.J., "FASTrescue Deliverable D3.3e: Bericht zur vollnumerischen Vorhersage von Hubschrauber-Überfluglärm und Vergleich zu experimentellen Daten", DLR Internal Report, 2020
- [3] Wolf, C.C., "CHARME: Blade Deformation Measurements using Stereo Pattern Recognition", DLR EB 224-2017 C 19, 45 Seiten, 2017.
- [4] Wolf, C.C., Braukmann, J.N., Bauknecht, A., Raffel, M., "Elastic Main Rotor Blade Motions on Whirl Tower - Optical Measurement Technique", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Sept 4-6, 2018.
- [5] Yin, J., "Investigation of Rotor Noise Shielding Effects by the Helicopter Fuselage in Forward Flight", Journal of Aircraft, Vol. 56, No. 4, 2019. DOI: 10.2514/1.C035009

## **AP 4.1: Charakterisierung Flugbereichsgrenzen am isolierten Rotor und Verbesserung Vorhersage**

In diesem Arbeitspaket gibt es Veröffentlichungen zum Möwe Experiment im TWG, zum SWG Flügelspitze Dynamic Stall Experiment, zur Entwicklung TAU-Simpack Kopplung für Mehrkörpersimulation, und zu RTG Experimenten mit einer klassischen Blattspitze und mit einer fortschrittlichen Blattspitze. Folgende Preise wurden dadurch gewonnen:

- [1] Best aerodynamics paper from the 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2017

### **TWG Experiment Möwe**

[1] Lütke, Benjamin (2017) Dynamic Stall on a Pitching Double-Swept Rotor Blade Tip. Dissertation, Technische Universität München.

[2] Lütke, B., Nuhn, J., Govers, Y., Schmidt, M., "Design of a rotor blade tip for the investigation of dynamic stall in the transonic wind-tunnel Göttingen", *The Aeronautical Journal*, Vol. 120, No. 1232, pp1509-1533, 2016 DOI: 10.1017/aer.2016.74

### **SWG Experiment Flügelspitze**

[3] Gardner, A.D., Merz, C.B., Wolf, C.C., "Effect of sweep on a pitching finite wing", *American Helicopter Society 74th Annual Forum*, Phoenix, May 14-17, 2018.

[4] Gardner, A.D., Merz, C.B., Wolf, C.C., "Effect of sweep on a pitching finite wing", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 3, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.032007

[5] Kaufmann, K. "Numerische Untersuchung des dreidimensionalen dynamischen Strömungsabrisses an einer Blattspitze", Doktorarbeit, Leibniz University Hannover, 2017

[6] Kaufmann, K., Gardner, A. D., Costes, M., "Comparison between two-dimensional and three-dimensional dynamic stall", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 315-325. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_28

[7] Kaufmann, K., Merz, C.B., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Simulations on a Pitching Finite Wing", *Journal of Aircraft*, Vol. 54, No. 4, pp. 1303-1316, 2017, DOI: 10.2514/1.C034020

[8] Kaufmann, K., Merz, C.B., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Simulations on a Pitching Finite Wing", 34th AIAA Applied Aerodynamics conference, Washington, DC, June 13-17, 2016.

[9] Merz, C.B. "Der dreidimensionale dynamische Strömungsabriss an einer schwingenden Rotorblattspitze", Doktorarbeit, Leibniz University Hannover, 2016

[10] Merz, C.B., "Dynamic Stall Investigations on the Pitching DSA-9A Rotor Blade Tip Model in the SWG - Test Campaign 2015", DLR IB 224-2015 A116, 116 Pages, 2016.

[11] Merz, C.B., Wolf, C.C., Richter, K., Kaufmann, K., Mielke, A., Raffel, M., "Spanwise Differences in Static and Dynamic Stall on a Pitching Rotor Blade Tip Model", *Journal of the American Helicopter Society*, Volume 62, Number 1, 2017. DOI: 10.4050/JAHS.62.012002

[12] Merz, C.B., Wolf, C.C., Richter, K., Kaufmann, K., Raffel, M., "Experimental Investigation of Dynamic Stall on a Pitching Rotor Blade Tip", In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132*, 2016, pp 339-348. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_30

[13] Mielke, A., Merz, C.B., "Experimentelle Untersuchungen der Strömung an einem Rotorblatt", DLR IB 224-2015 A117, 115 Pages, 2016.

### **TAU-Simpack Kopplung für Mehrkörpersimulation**

[14] Arnold, J. Using Multibody Dynamics for the Flutter Assessment of an Isolated Rotor with Innovative Blade Layout. AHS Specialists' Conference on Aeromechanics Design for Vertical Lift, 20.-22. Jan. 2016, San Francisco, California, USA.

[15] Arnold, J., "Flutter Assessment of a Rotor Blade with Innovative Layout in Hover using Indicial Aerodynamics", *American Helicopter Society 72nd Annual Forum*, West Palm Beach, May 17-19, 2016.

[16] Arnold, J., Waitz, S., "Using multibody dynamics for the stability assessment of a new rotor test rig ", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.

[17] Arnold J, Waitz S. "Using Multibody Dynamics for the Stability Assessment of a New Double-Swept Rotor Blade Setup", 44th European Rotorcraft Forum, Delft, The Netherlands, September 18-21, 2018.

[18] Surrey, S., Ortun, B., Truong, K.-V., Wienke, F., " Investigation of the structural blade dynamics and aeroelastic behavior of the 7A rotor" , *American Helicopter Society 72nd Annual Forum*, West Palm Beach, May 17-19, 2016.



### **RTG Experiment klassische Blattspitze**

- [19] Blanke, J., "Aerodynamische Untersuchung des Wirbelnachlaufs eines Hubschrauberrotors mit einem Panel Verfahren", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Oktober 2018.
- [20] Gardner, A.D., Kaufmann, K., Richter, K., "Investigation of three-dimensional Dynamic Stall", High Performance Computing in Science and Engineering, Garching/Munich, 2016.
- [21] Letzgus, J., Gardner, A.D., Schwermer, T., Keßler, M., Krämer, E., "Numerical investigations of Dynamic Stall on a Rotor with Cyclic Pitch Control", 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, Italy, September 12-15, 2017.
- [22] Letzgus, J., Gardner, A.D., Schwermer, T., Keßler, M., Krämer, E., "Numerical investigations of Dynamic Stall on a Rotor with Cyclic Pitch Control", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012007
- [23] Schwermer, T. "Experimentelle Untersuchung des dynamischen Strömungsabrisses an einem Rotor mit axialer Zuströmung", Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover, 2018
- [24] Schwermer, T., "Hubschraubaerodynamik - Dreidimensionaler Strömungsabriss im rotierenden System", Beitrag zur mobiles2016 (Fachzeitschrift für Konstrukteure: <http://www.mobiles.de>)
- [25] Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "A novel experiment to understand the dynamic stall phenomenon in rotor axial flight", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 64, No. 1, 2019. DOI: 10.4050/JAHS.64.012004
- [26] Schwermer, T., Gardner, A.D., Raffel, M., "Dynamic Stall Experiments on a Rotor with High Cyclic Setting in Axial Inflow", American Helicopter Society 73rd Annual Forum, Fort Worth, May 9-11, 2017.
- [27] Schwermer, T., Richter, K., Raffel, M., "Development of a Rotor Test Facility for the Investigation of Dynamic Stall", In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132, 2016, pp 663-673. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_58

### **RTG Experiment fortschrittliche Blattspitze**

- [28] Kaufmann, K., Müller, M.M., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Computations of Double-Swept Rotor Blades", STAB 2018, Darmstadt, 6-7 November, 2018.
- [29] Kaufmann, K., Müller, M.M., Gardner, A.D., "Dynamic Stall Computations of Double-Swept Rotor Blades", In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 142, 2020, pp 351-361. DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_34
- [30] Mueller, M.M., Schwermer, T., Mai, H., Stieg, C. "Development of an innovative double-swept rotor blade tip for the rotor test facility Goettingen", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Friedrichshafen, Sept 4-6, 2018.

## **AP 4.2: Bewertung Flugbereichsgrenzen neue Hubschrauberkonfiguration**

In diesem Arbeitspaket gibt es keine Veröffentlichungen, da die Messung im NWB nicht stattgefunden hat.

## **AP 4.3: Erweiterung Berechnungskette Flugbereichsgrenzen Gesamthubschrauber**

In diesem Arbeitspaket gibt es keine Veröffentlichungen, da die TAU-HOST Kopplung nicht funktionierte.

## **AP 5.1: Weiterentwicklung Vorhersageverfahren**

In diesem Arbeitspaket gibt es keine Veröffentlichungen, da die TAU-HOST Kopplung nicht funktionierte.

## AP 5.2: Weiterentwicklung Messtechnik

In diesem Arbeitspaket gibt es Veröffentlichungen zur Messtechnikentwicklung für Grenzschicht-Transitions-Messungen, Ablösedetektion, BOS, und Windkanalmesstechnik.

Folgende Preise wurden dadurch gewonnen:

- [1] Alfred Gessow best paper award 2019,
- [2] Vertical flight society forum best aerodynamic paper 2019:

### Grenzschichttransition:

- [1] Eder, C., "Analyse der Differenzinfrarotthermographie", Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, August 2016.
- [2] Gardner, A. D., Richter, K., "Transition determination on a periodic pitching airfoil using phase averaging of pressure data", In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 132, 2016, pp 291-301. DOI: 10.1007/978-3-319-27279-5\_26
- [3] Gardner, A.D., Eder, C., Wolf, C.C., Raffel, M. "Analysis of differential infrared thermography for boundary layer transition detection", Experiments in Fluids, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI:10.1007/s00348-017-2405-z
- [4] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, Poland, September 17-20, 2019. (Invited Paper)
- [5] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", Vertical Flight Society 75th Annual Forum, Philadelphia, Pennsylvania, May 13-16, 2019.
- [6] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Heineck, J.T., Barnett, M., Raffel, M., "Helicopter rotor boundary layer transition measurement in forward flight using an infrared camera", Journal of the American Helicopter Society, 2020. DOI: 10.4050/JAHS.65.012002
- [7] Gleichauf, D., Dollinger, C., Balaresque, N., Gardner, A.D., Sorg, M., Fischer, A., "Contrast enhancement in thermographic flow visualization" Wind Energy Science Conference (WESC ), Cork, Ireland, 16-20 June 2019.
- [8] Goerttler, A., Gardner, A. D., Richter, K., "Unsteady boundary layer transition detection by automated analysis of hot film data", " In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XI, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 136, 2017, pp 387-396. DOI: 10.1007/978-3-319-64519-3\_35
- [9] Goerttler, A., Gardner, A. D., Richter, K., "Unsteady boundary layer transition detection by automated analysis of hot film data", STAB 2016, Braunschweig, 8-9 November, 2016.
- [10] Heineck, J.T., Overmeyer, A., Wolf, C., Raffel, M., "Boundary Layer Transition Visualization of a Helicopter Blade in Forward Flight Using Thermography", 18th International Symposium on Flow Visualization, Zürich, Switzerland, June 26-29, 2018.
- [11] Mertens, C., "Unsteady Boundary Layer Transition Measurements with Infrared Thermography: Development of Improved Measurement Schemes", Master of Science, Delft University of Technology, 2018
- [12] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., "Unsteady boundary layer transition detection with local infrared thermography", STAB 2018, Darmstadt, 6-7 November, 2018.
- [13] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., "Unsteady boundary layer transition detection with local infrared thermography", In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 142, 2019, pp 382-391. DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_37
- [14] Mertens, C., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Schrijer, F.F.J., van Oudheusden, B.W., "Advanced infrared thermography data analysis for unsteady boundary layer transition detection", Measurement Science and Technology, Vol. 31, No. 1, 2020. DOI: 10.1088/1361-6501/ab3ae2
- [15] Richter, K., Wolf, C.C., Gardner, A.D., Merz, C.B., "Detection of Unsteady Boundary Layer Transition Using Three Experimental Methods", AIAA-2016-1072, AIAA SciTech 2016, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego (CA), USA, 4-8 January 2016
- [16] Wolf, C. C., Mertens, C., Gardner, A. D., Dollinger, C., Fischer, A., "Optimization of differential infrared thermography for unsteady boundary layer transition measurement", Experiments in Fluids, Vol. 60:19, 2019. DOI: 10.1007/s00348-018-2667-0
- [17] Wolf, C.C., Gardner, A.D., Goerttler, A., Richter, K., "Instationäre Transitionsmessung mit neuartigen Messmethoden", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, September 13-15, 2016, Braunschweig (Vortrag ohne Paper, Folien stammen aus Kai Richters AIAA-Vortrag in San Diego)
- [18] Wolf, C.C., Mertens, C., Gardner, A.D., Dollinger, C., Fischer, A., "Optimisation of Differential Infrared Thermography for Unsteady Boundary Layer Transition Measurement", 44th European Rotorcraft Forum, Delft, September 18-20, 2018.



### **Ablösedetektion:**

- [19] Gardner, A. D., Wolf, C.C., Raffel, M., "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 9, 2016. DOI: 10.1007/s00348-016-2235-4
- [20] Gardner, A.D., Wolf, C.C., Raffel, M., "A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography", 42nd European Rotorcraft Forum, September 6-8, 2016, Lille, France
- [21] Raffel, M., Gardner, A.D., Schwermer, T., Merz, C.B., Weiss, A., Braukmann, J, Wolf, C.C., "Rotating Blade Stall Maps Measured by Differential Infrared Thermography", *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 5, 2017. doi:10.2514/1.J055452
- [22] Raffel, M., Gardner, A.D., Schwermer, T., Merz, C.B., Weiss, A., Braukmann, J, Wolf, C.C., Ewers, B., "Differential Infrared Thermography (DIT) for Dynamic Stall Detection", 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 04-07 July, 2016

### **WT Measurement techniques**

- [23] Gardner, A.D., Richter, K., "Effect of the Model-Sidewall Connection for a Dynamic Stall Airfoil Experiment", *Journal of Aircraft*, 2020. DOI: 10.2514/1.C035613
- [24] Weiland, P., Michelis, S., Gardner, A.D., "Numerical Simulation of an Adaptive Wall in a Virtual Transonic Wind Tunnel", *AIAA Journal*, Vol. 55, no. 9, 2017. DOI: 10.2514/1.J055481

### **BOS/PIV**

- [25] Domogalla, V., "Quantitative Erfassung von Wirbeln durch Impfpartikel und bildgebende Messtechniken", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, September 2019.
- [26] Gardner, A.D., Raffel, M., Schwarz, C., Braukmann, J.N., Wolf, C.C., "Reference-free digital shadowgraphy using a moving BOS background", *Experiments in Fluids*, Vol. 61, No. 2, 2020. DOI: 10.1007/s00348-019-2865-4
- [27] Hartje, L.P., "Untersuchung des Einflusses der Particle Image Velocimetry auf die Charakterisierung von Blattspitzenwirbeln", Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Oktober 2018.
- [28] Siwczak, N., "Untersuchung von innovativen Helikopterkonfigurationen am Modellversuch", Bachelorarbeit, TFD, Universität Hannover, April 2016
- [29] Stadler, H., Bauknecht, A., Siegrist, S., Flesch, R., Wolf, C. C., van Hinsberg, N., Jacobs, M., "Background-oriented schlieren imaging of flow around a circular cylinder at low Mach numbers", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 9, 2017. DOI 10.1007/s00348-017-2398-7
- [30] Stauber, W., "Evaluation of the tip vortex flowfield at the Rotor Test Facility Göttingen", Masterarbeit, University Göttingen, May 2018.

### **AP 5.3: Aufbau NWB Gesamthubschraubermodell**

Dieses Arbeitspaket liefert keine Veröffentlichungen, da es sich um ein Entwicklungsprojekt handelt, welches zu Projektende noch nicht abgeschlossen war.

### **AP 5.3: Begleitung BO105 Ertüchtigung**

In diesem Arbeitspaket gibt es keine Veröffentlichungen, da es sich um ein Entwicklungsprojekt handelt, welches zu Projektende noch nicht abgeschlossen war.

---

## Ergebnisse ohne Zuordnung

Das sind Ergebnisse, die mit Gegenfinanzierung aus FAST-Rescue gewonnen wurden, aber keine bestimmte Zuordnung haben:

- [1] Gardner, A.D., van der Wall, B.G., "Computation of reference polars for the SABRE chord extension project", DLR Internal Report DLR-IB-AS-GO-2018-19, 15pp, 2018.
- [2] Geissler, W., "Flapping wing energy harvesting: aerodynamic aspects", CEAS Aeronautical Journal, 2019. DOI: 10.1007/s13272-019-00394-1
- [3] Geissler, W., van der Wall, B.G., "Dynamic stall control on flapping wing airfoils", Aerospace science and Technology Vol. 62, 2017. DOI: 10.1016/j.ast.2016.12.008
- [4] Hoeveler, B., Wolf, C. C., Raffel, M., Janser, F., "Aerodynamic Study on Efficiency Improvement of a Wing Embedded Lifting Fan Remaining Open in Cruise Flight", AIAA Aviation 2018, Atlanta, GA, USA, June 25-29, 2018.
- [5] Raffel, K., Richter, K., Gardner, A.D., Fechtner, F. "Hubschrauberkonfiguration für Hubschrauber mit starrem Horizontalrotor", Deutsches Patent, DE 10 2015 107 913 A1, 24 November 2016.
- [6] Wolf, C.C., "ECO-HC2 Wind Tunnel Tests", DLR EB 224-2016 C 6, 48 Seiten, 2016.

---

## 6. Referenzen

- [1] Gardner, A.D. (2016): FAST-Rescue Projektplan, 45 Seiten.
- [2] Gardner, A.D. (2016): Anhang zum FAST-Rescue Projektplan, 159 Seiten.
- [3] Gardner, A.D. (2020) : FAST-Rescue - Projektleiterbericht, DLR-EB 224-2020 C 41, 28 Seiten.

## 7. Anhang A: Eingebundene Literatur