

DLR-IB-AE-GO-2021-64

**Untersuchung der dreidimensionalen
dynamischen Strömungsablösung an
Rotorblättern**

Martin Müller

Institut für Aeroelastik



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Document Description

Titel	Untersuchung der dreidimensionalen dynamischen Strömungsablösung an Rotorblättern
Betreff	DLR-IB-AE-GO-2021-64
Institut	Institut für Aeroelastik
Erstellt von	M.Sc. Martin Müller
Beteiligte	Dipl. -Ing. Johannes Letzgus, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG), Universität Stuttgart
Geprüft von	Dr. rer. nat. Holger Mai
Freigabe von	Dr. rer. nat. Holger Mai, Prof. Dr.-Ing. Lorenz Tichy
Datum	30.03.2021
Version	1.0
Dateipfad	

Untersuchung der dreidimensionalen dynamischen Strömungsablösung an Rotorblättern

Zusammenfassung:

Auf Seiten des DLR wurde ein qualitativ hochwertiges und erkenntnisreiches Experiment mit doppelt gepfeilter Blattspitze durchgeführt und ausgewertet. Vor allem der Erkenntnisgewinn in Bezug auf das elastische Deformationsverhalten und den strömungsmechanischen Ablöse- und Wiederanlegevorgang ist als guter Fortschritt anzusehen. Die Implementierung einer Messmethode wie den Blattwurzel-DMS in ein hochfrequent rotierendes System erwies sich als herausfordernd, da sämtliche Rotationskräfte die Messtechnik beeinflussen und im nachträglich teilweise korrigiert werden müssen. In der Auswertung ist es gelungen, eine stabile Auswerteroutine für optische Messverfahren wie die Blattspitzenkamera zu entwickeln.

Auf Seiten des IAG wurde zunächst die numerische Prozesskette der Detached-Eddy-Simulation (DES) im Strömungslöser FLOWer verbessert. Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung und Untersuchung von verbesserten Verfahren, die den Umschaltvorgang vom RANS- in den LES-Modus steuern, um das Problem der gitterinduzierten Ablösung zu verhindern. Die neuartigen Ansätze, die auf unterschiedlichen numerischen und physikalischen Grundlagen basieren, lieferten letztendlich jedoch bei allen Testfällen unterschiedlichster Komplexität ein korrektes Umschalten, das heißt, dass anliegende Grenzschichtströmungen vollständig im RANS-Modus und nur stark abgelöste Strömungen im LES-Modus behandelt werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine scherschichtadaptive Filterweite im LES-Gebiet eine frühere und damit deutlich realistischere Ausbildung von Strömungsinstabilitäten nach Ablösung ermöglicht, was bei zukünftigen Simulationen zur effektiven Verminderung des Grey-Area-Problems eingesetzt werden kann.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V.

DLR – GERMAN AEROSPACE CENTER
Institute of Aeroelasticity

Institutsleiter:

Abteilungsleiter:

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Lorenz Tichy

Dr. rer. nat. Holger Mai

M.Sc. Martin Müller

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	viii
1 Motivation	1
2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten	3
2.0.1 Aufbau und Verbesserung der numerischen Prozesskette (IAG)	3
2.0.2 Experimenteller Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik (DLR)	4
3 Ergebnisse	7
3.0.1 Numerische Simulationen (IAG)	7
3.0.2 Auswertung der experimentellen Untersuchung (DLR)	11
4 Zusammenfassung	15
Literaturverzeichnis	17
Abbildungsverzeichnis	19

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Re	Reynoldszahl
R	Rotorradius in [mm]
r/R	Rotorradiusposition
t/T	Periodenzeitpunkt
C_D	Widerstandsbeiwert
f	Rotordrehfrequenz in [Hz]
c_p	Druckbeiwert in [-]

Abkürzungen & Definitionen

AE	DLR-Institut für Aeroelastik
CFD	Computational fluid dynamics
DDES	Delayed-Detached-Eddy-Simulation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt/German Aerospace Center
DMS	Dehnungsmessstreifen
IAG	Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart
RTG	Rotor Testanlage Göttingen
SPR	Stereo Pattern Recognition
TSP	Temperature Sensitive Paint
PSP	Pressure Sensitive Paint
VIADES	Vorticity-Integrated Algebraic DES

1 Motivation

Die Zielsetzung des Projekts war es, das Verständnis von dreidimensionaler dynamischer Strömungsablösung, genannt Dynamic Stall, im rotierenden System auszubauen und die Fähigkeit zur numerischen Simulation zu verbessern. Ein neuer Schwerpunkt lag dabei auf der Untersuchung eines Modellrotorblatts mit doppelt gepfeilter Blattsitze und deren Einfluss auf Dynamic Stall sowie der Wechselwirkung des Phänomens mit dem strukturdynamischen Verhalten des Blatts. Hierbei wurden eine innovative Blattgeometrie, sowie ein 4 - Blatt Rotor untersucht und Vergleiche der Auswirkungen dieser Änderungen zu bereits bekannten konventionellen Rotoren durchgeführt.

Hinsichtlich der numerischen Prozesskette war eine Ausgangsfrage, wie diese um laminar-turbulente Grenzschichttransition und Fluid-Struktur-Kopplung erweitert werden kann und muss, um die Simulation von Dynamic Stall zu verbessern. Ein entscheidendes Ziel war zudem, aufbauend auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts, die bekannten Schwachstellen der Delayed-Detached-Eddy-Simulation (DDES) zu überwinden, das heißt, gitterinduzierte Ablösung [14] zu verhindern und das Grey-Area-Problem [15] zu verringern.

In Bezug auf das Experiment lag die Aufgabenstellung in der Instrumentierung der Rotorblätter, Kalibrierung der Messtechnik, sowie in der Datenauswertung. Die Ausgangsfrage war vor allem, wie die Messtechnik positioniert und kalibriert werden kann und muss, um physikalisch sinnvolle Messgrößen hinsichtlich des Dynamic Stall zu erfassen und somit das Verständnis für dessen Vorgang zu verbessern. Ein weiterführendes Ziel war zudem, die Datenauswertung bezogen auf das Deformationsverhalten weiterzuentwickeln, um so einen besseren Einblick in das elastische Blattverhalten zu bekommen.

2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten

2.0.1 Aufbau und Verbesserung der numerischen Prozesskette (IAG)

Zunächst erfolgte der Aufbau des numerischen Setups ausschließlich auf CFD-Seite für den Strömungslöser FLOWer, das heißt ohne Fluid-Struktur-Kopplung. Dort wurde aufgrund guter Erfahrungen bei der Simulation des Vorgängerrotors [11, 4] und für einen besseren Vergleich mit URANS-Simulationen mit dem TAU-Löser [6] nur das isolierte Rotorblatt berücksichtigt. Der Vergleich mit TAU diente dann zur Überprüfung des Setups und ergab eine gute qualitative Übereinstimmung, wobei quantitative Unterschiede auf leicht unterschiedliche Randbedingungen und Auswertemethoden zurückgeführt wurden [5]. Ein im Projektantrag geplanter Vergleich zwischen aktueller Vierblatt-Konfiguration und dem vorausgegangenen Zweiblatt-Rotor wurde mit FLOWer auf Seiten des IAG nicht explizit durchgeführt, da dies bereits vom DLR mit TAU untersucht worden war [6]. Dort zeigten sich große phänomenologische Unterschiede im Dynamic-Stall-Verhalten aufgrund der doppelt gepfeilten Blattspitze, was von den FLOWer-Simulationen bei etwas anderen Randbedingungen bestätigt werden konnte, siehe Abschnitt 3.0.1. Ebenfalls erfolgte abweichend vom ursprünglichen Konzept keine Simulation des Modellrotors in Vorwärtsflugkonfiguration aus folgenden Gründen: Zum einen stellte sich das Rotorblatt als deutlich steifer heraus als erwartet, was in Verbindung mit der modellbedingten geringeren Streckung die Übertragbarkeit auf einen echten Hubschrauber im Vorwärtsflug zweifelhaft erscheinen ließ. Zum anderen ergab sich am IAG die Möglichkeit, einen Dynamic-Stall-relevanten Flugfall des Bluecopter-Demonstrators zu simulieren und mit Flugmessdaten zu vergleichen, wodurch stellvertretend umfangreiche Erkenntnisse hinsichtlich Dynamic Stall an einer realen Hubschrauberkonfiguration gewonnen wurden [12].

Zur Fluid-Struktur-Kopplung wurde dann ein Strukturmodell des RTG-Modellrotors auf Basis eines Euler-Bernoulli-Balkens für das Flugmechanikprogramm CAMRAD II aufgebaut. Die wesentlichen Materialeigenschaften wurden aus Daten von statischen Biege- und Torsionsversuchen, die vom DLR gewonnen und bereitgestellt wurden, abgeschätzt. Ein Vergleich zwischen gekoppelten FLOWer/CAMRAD II-Ergebnissen und der DLR-Messungen für verschiedene kollektive Einstellwinkel im Schwebeflugfall [8] sowie einen Dynamic-Stall-Fall (siehe Abschnitt 3.0.1) zeigte eine zufriedenstellende Übereinstimmung, weshalb auf eine mögliche Verwendung eines höherwertigen aber auch aufwändigeren SIMPACK-Strukturmodell verzichtet wurde.

Die Implementierung der modernen Grenzschichttransitionsmodelle γ - Re_θ [9] und AFT [1] in FLOWer erfolgte im Rahmen einer Promotion [21] in einer anderen Arbeitsgruppe am IAG. Im vorliegenden DFG-Projekt wurde das γ - Re_θ -Modell an einem schwingenden Flügel getestet, wobei sich zeigte, dass zwar die Transitionslage gut getroffen wurde, es aber im Gegensatz zum Experiment immer zu einer laminaren Ablöseblase kam [3]. Des Weiteren wurde allgemein eine starke Sensitivität gegenüber den Randbedingungen und mangelnde numerische Robustheit beziehungsweise Konsistenz festgestellt. Deshalb wurde, abweichend vom Projektantrag, entschieden, auf Transitionsmodellierung zu verzichten, da bei komplexen Strömungen im rotierenden System mit weiteren numerischen Schwierigkeiten und Unsicherheiten zu rechnen war, was von anderen Untersuchungen [7] bestätigt wurde.

Die Verbesserung der hybriden RANS/LES-Simulation, insbesondere zur Verhinderung von gitter-induzierter Ablösung, erwies sich als deutlich komplizierter und zeitaufwändiger, als ursprünglich angenommen, was besonders für die robuste Detektion des Grenzschichtrands galt. Es zeigte sich, dass bei komplizierteren Strömungen wie am Hubschrauber, bei denen die Anströmung nicht gleichförmig und wirbelfrei ist, einfache, bekannte Methoden versagen. Im Rahmen der in diesem DFG-Projekt am IAG entstandenen Promotion [10] konnten jedoch verschiedene selbst entwickelte [22, 13, 21, 10] und aus der jüngsten Literatur entnommene Verfahren, auch zur Reduktion des Grey-Area-Problems, erfolgreich an anspruchsvollen Testfällen demonstriert werden, siehe Abschnitt 3.0.1.

2.0.2 Experimenteller Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik (DLR)

Im Rahmen der Versuchsvorbereitung erfolgte zunächst die Vermessung der radialen Verwindung von allen doppelt gepfeilten Rotorblättern. Darauffolgend wurden alle Rotorblätter gegeneinander ausgependelt (gewuchtet) und ohne Kalibrierung der Messtechnik am Rotor montiert (siehe Abbildung 2.1). Anschließend wurden alle eingesetzten Messtechniken kalibriert (Messtechnik im/am Rotorblatt und optische externe Messtechnik). Dieses Vorgehen hatte sich bereits in vorangegangenen Experimenten am RTG etabliert und bewährt [17]. Um ein möglichst umfangreiches Gesamtbild des Rotorblattverhalten zu bekommen, wurde verschiedenste Messtechnik kombiniert: Blattspitzenkamera (optische Blattspitzendeformationsmessung), Blattwurzel-Dehnungsmessstreifen, siehe Abbildung 2.2 (Deformations- und Blattschnittkraftmessung), 22 Kulite-Drucksensoren (Messung des Oberflächendrucks), 6-Komponenten Piezowaage (Messung der integralen Kräfte und Moment um den Rotorkopf), Stereo Pattern Recognition (SPR, Messung der radialen Deformation), Hallsensoren (Messung der Einstellwinkel an der Blattwurzel) und Pt100-Temperatursensoren (Messung der Lagertemperatur). Die im Projektantrag als optional geplanten Messungen mit PIV (Particle Image Velocimetry) oder TSP/PSP (Temperature and Pressure Sensitive Paint) konnten aufgrund der aktuellen Coronavirus-Situation nicht im geplanten DFG-Projektzeitraum durchgeführt werden.

Für die Überführung der Messdaten aus dem rotierenden ins stationäre System wurde ein am Rotorkopf montiertes 30-Kanal-Telemetriesystem genutzt (siehe Abbildung 2.1). Um die Blattschnittkräfte und -momente, sowie die Blattspitzendeformation aus den Dehnungsmessstreifen an der Blattwurzel zu erhalten, wurden diese über statische Biege- und Torsionsversuche kalibriert (eingebauter Zustand). Über Umlenkrollen und Profilschablonen wurden an 3 radialen Positionen jeweils 3 unterschiedliche Belastungen aufgeprägt: 1. reine Biegebelastung (Lastangriffspunkt in der elastischen Achse), 2. reine Torsionsbelastung und 3. Kombination aus Torsions- und Biegebelastung. Somit konnte nach [20] ein Übersprechen der einzelnen Messbrücken zueinander berücksichtigt werden. Für die Positionierung ($r/R = 0.30$) der Dehnungsmessstreifen (DMS) (Abbildung 2.2) wurden vorab FE-Simulationen mit den oben genannten Lastfällen durchgeführt, um den Bereich des besten Kraft- und Dehnungsflusses zu lokalisieren. In einem ersten Vorversuch mit 2-Blatt-Rotor hat sich gezeigt, dass die geforderten Messgrößen mittels DMS zuverlässig und qualitativ hochwertig gemessen werden können. Für die Kalibrierung der Blattspitzenkamera musste lediglich ein Referenzbild in ausgerichtetem stationären Zustand aufgenommen werden. Wesentlich schwieriger und zeitaufwändiger gestaltete sich die Entwicklung einer robusten Auswerterroutine für die Blattspitzenbilder. Es zeigte sich, dass bei kleinsten Belichtungsunterschieden der Bilder sowie Vibrationen der Kamera die Objekterkennung im Bild wesentlich erschwert wird. Im Rahmen dieses DFG-Projektes ist es jedoch gelungen, eine robuste Auswerterroutine für die Blattspitzenkamera zu entwickeln, die gute Übereinstimmung mit den Blattwurzel-DMS

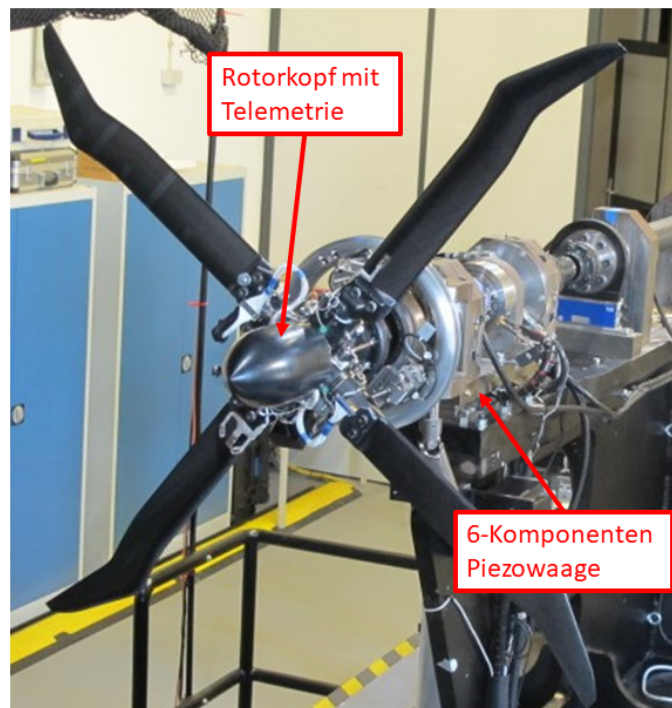


Abbildung 2.1: Rotorteststand Göttingen (RTG) mit doppelt-gepfeilten Rotorblättern.

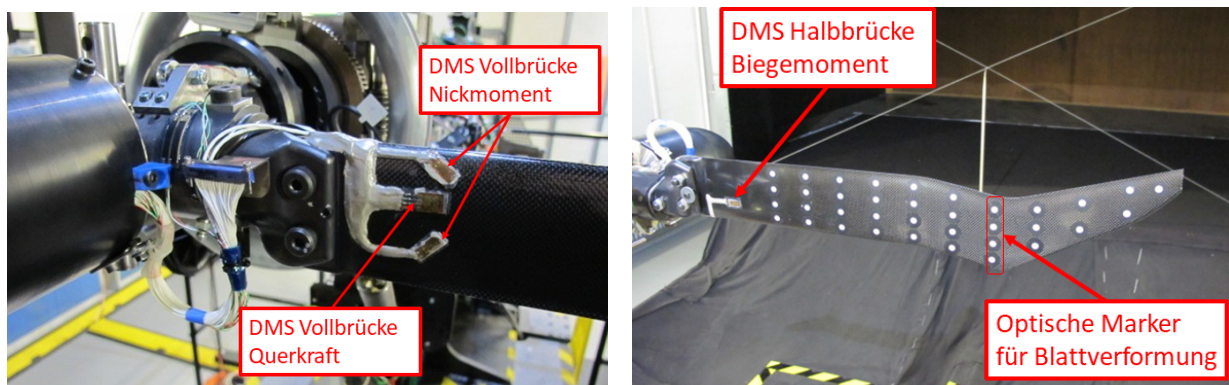


Abbildung 2.2: Rotorblatt mit Querkraft- und Nickmomentenbrücke (links) und Rotorblatt (rechts) mit SPR und DMS-Biegebrücke.

zeigt, siehe Abschnitt 3.0.2. Die Drucksensoren wurden mittels einer abgedichteten Plexiglasform kalibriert. Diese wurde mittels Mensor (Druckkalibriergerät) bedruckt und vakuumiert.

3 Ergebnisse

3.0.1 Numerische Simulationen (IAG)

Verbesserung der hybriden RANS/LES-Simulation

Das bekannte Problem der gitterinduzierter Ablösung der DES ist in Abbildung 3.1 demonstriert, wo die Strömung in einem Schnitt bei 77% Rotorradius ($0,77R$) eines Dynamic-Stall-Falls am RTG dargestellt ist. Mit DDES tritt im Gegensatz zur URANS früh ($t/T = 0,42$ ($t/T = 0$ Beginn des Aufnickvorgangs)) eine sehr starke Hinterkantenablösung auf, die sich dann zu einem massiven, kohärenten Wirbel aufrollt ($t/T = 0,45$), der weder mit URANS noch im Experiment [17] auftritt. Durch eine Erhöhung der DDES-Modellkonstante C_{d1} kann dieser Modellierungsfehler rein numerisch reduziert werden, wobei im vorliegenden Fall mit einem Wert von $C_{d1} = 30$ für SST-DDES keine gitterinduzierte Ablösung mehr auftritt. Beim am IAG entwickelten Bernoulli-Based Boundary-Layer Shielding (BDES) [22] wird der Grenzschichttrand mithilfe der kompressiblen Bernoulli-Gleichung zum „Shielding“ der Grenzschicht vor dem LES-Modus abgeschätzt. Die ebenfalls selbst entwickelte Vorticity-Integrated Algebraic DES (VIAGES) [13] ist ein nicht-lokaler Ansatz, bei dem die Wirbelstärke in wandnormaler Richtung zu einer außerhalb der Grenzschicht schnell konvergierenden Pseudo-Geschwindigkeit aufintegriert wird. Mit beiden Verfahren wird die gitterinduzierte Ablösung vollständig verhindert, was ebenfalls mit der jüngst vorgestellten Erweiterung der sogenannten Zonalen DES (ZDES19) [2] gelingt. Alle untersuchten DDES-Erweiterungen zeigen bei massiv abgelöster Strömung ($t/T = 0,62$) im Gegensatz zur URANS eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment, was ein korrektes Umschalten in den LES-Modus andeutet. Die Erweiterungen unterscheiden sich vor allem in ihrer physikalischen Grundlage, der Intensität, mit der der LES-Modus erzwungen wird, dem Implementierungsaufwand und der Robustheit gegenüber einer gestörten Anströmung. Für weitere Verfahren und Testfälle sowie zur Vertiefung wird hier auf die abgeschlossenen Promotionen verwiesen [21, 10].

Zur Verminderung des Grey-Area-Problems, das das (Nicht-)Vorhandensein von aufgelöster Turbulenz an der RANS/LES-Schnittstelle betrifft, wurde eine alternative LES-Filterweite Δ_{SLA} [19] untersucht, die die durch das Turbulenzmodell generierte Wirbelviskosität in freien Scherschichten gegenüber der konventionellen Filterweite (größte Kantenlänge einer Gitterzelle Δ_{max}) deutlich reduziert. Der Effekt ist in Abbildung 3.2 zu sehen, wo die Evolution einer anwachsenden Hinterkantenablösung visualisiert ist. Zum ersten Zeitpunkt ($t/T = 0,33$) ist im hinteren Bereich der Oberseite des $0,77R$ -Profilschnitts eine abgelöste, aber noch stabile Scherschicht zu erkennen, ähnlich wie bei der Standard-DDES ($t/T = 0,42$ in Abbildung 3.1). Kurz darauf ($t/T = 0,35$ und $0,36$) werden jedoch schnell anwachsende Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten sichtbar, was deutlich besser mit der Realität übereinstimmt als das Aufrollen der Scherschicht zu einem massiven, kohärenten Wirbel, wie es mit Standard-DDES beobachtet wurde ($t/T = 0,45$ in Abbildung 3.1). Die alternative Filterweite befördert also in diesem Fall das physikalisch korrekte rasche Einsetzen von Strömungsinstabilitäten und größerskaliger Turbulenz und vermindert somit das Grey-Area-Problem effektiv. Weiterführende Details sowie die Anwendung auf einen zweiten Dynamic Stall-Fall sind in [10] zu finden.

Gekoppelte Simulation von Dynamic Stall am RTG-Rotor

Mit der aufgebauten CFD/CSD-Kopplung zwischen FLOWer und CAMRAD II wurde begleitend zum Experiment am DLR der Dynamic Stall-Fall mit einer Einstellwinkelschwingung von $\theta = 27^\circ \pm 6^\circ$ und einer Rotordrehzahl von $f = 23,6[Hz]$ berechnet. Abbildung 3.3 zeigt eine Wirbelvisualisierung und Oberflächendrücke der hochaufgelösten DDES zu mehreren Zeitpunkten im Dynamic-Stall-Zyklus. Es ist ersichtlich, dass sich der Ablösevorgang strömungsphysikalisch von dem unterscheidet, was am Vorgängerrotor, der Blätter ohne Pfeilung verwendete, beobachtet wurde. Statt einer charakteristischen Ω -förmigen Wirbelstruktur, die sich an der Vorderkante bei etwa $0,6R$ formt, beginnt die Vorderkantenablösung hier ganz an der Blattspitze und wandert dann radial nach innen. Dabei tritt kein einzelner Ω -Wirbel auf, stattdessen rollt sich die Ablösung zu einer Art Randwirbel auf, unter dem die Oberflächendrücke über die ganze Profiltiefe sehr niedrig sind. Radial innerhalb des Knicks der Doppelpfeilung tritt offensichtlich zu keinem Zeitpunkt im Zyklus nennenswerte Strömungsablösung auf. Ein vergleichbares Ablöseverhalten wurde auch in den am DLR durchgeführten TAU-Simulationen bei leicht anderen Randbedingungen

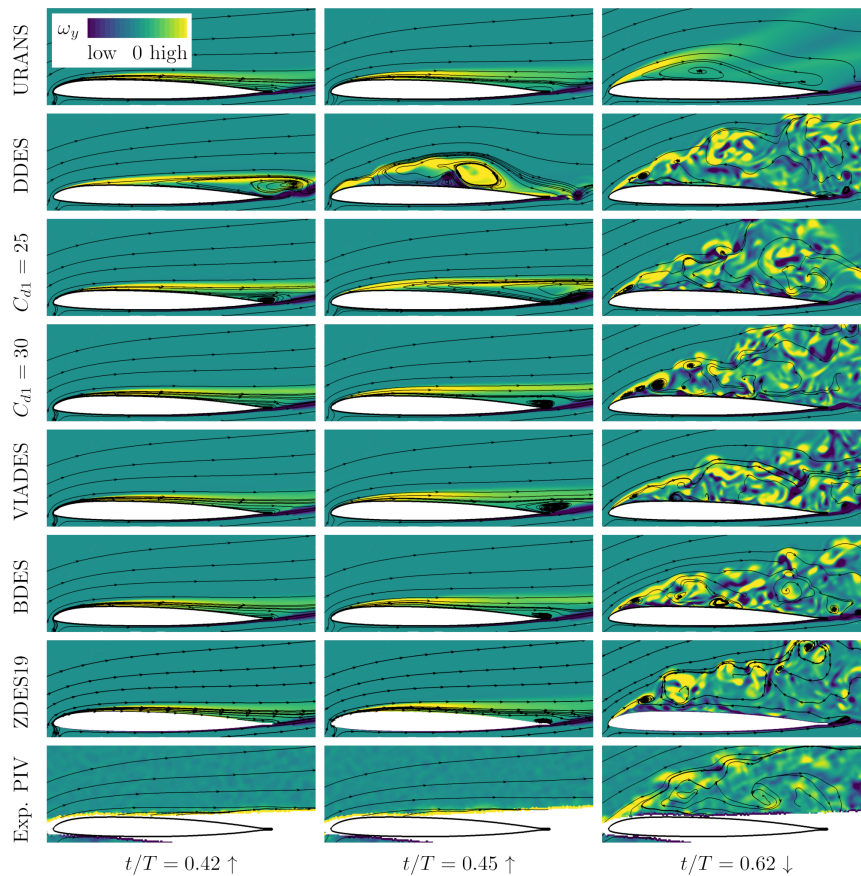


Abbildung 3.1: Schnitt bei $0,77R$ zeigt Wirkung getesteter DES-Shieldings bei RTG-Testfall, aus [10].

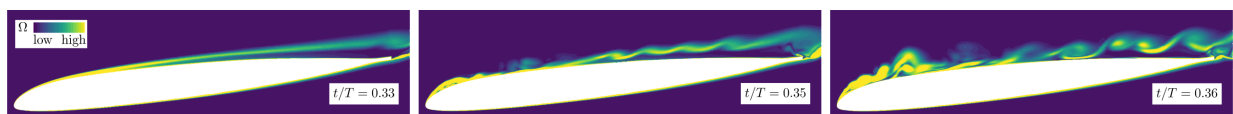


Abbildung 3.2: Schnitt bei $0,77R$ zeigt rasche Ausbildung von Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten nach Hinterkantenablösung mit alternativer LES-Filterweite Δ_{SLA} beim RTG-Testfall, aus [10].

beobachtet [6].

In Abbildung 3.4 ist ein Vergleich der Oberflächendrücke an drei radialen Positionen zwischen Simulation und Experiment dargestellt. Zu einem frühen Zeitpunkt im Zyklus ($t/T = 0.2$), bei dem die Strömung noch vollständig anliegt, stimmen die Verläufe zwar qualitativ gut überein, jedoch kommt es an jedem Schnitt zu größeren quantitativen Abweichungen. Eine Rolle könnte hier laminar-turbulente Transition spielen, die in der Simulation nicht erfasst wird, allerdings sind die Unterschiede so groß und konstant über den Zyklus, dass ein systematischer Fehler oder Versatz in der Berechnung vermutet wird, der bis dato leider nicht gefunden werden konnte. Bei $t/T = 0.46$ ist in der Simulation am äußersten Schnitt das Einbrechen der Saugspitze zu sehen, wie es charakteristisch ist für Dynamic Stall. Zeitlich passt dies sehr gut zum Experiment, bei dem die deutlich erhöhten Fehlerbalken, die die Standardabweichung der Phasenmittelung repräsentieren, ebenfalls auf Strömungsablösung hindeuten. An den beiden inneren Schnitten deutet hingegen die Druckverteilung sowohl von Simulation als auch vom Experiment auf noch anliegende Strömung hin, was sich mit den Erkenntnissen aus Abbildung 3.3 deckt. Das Wiederanlegen der Strömung am äußersten Schnitt erfolgt etwa zu $t/T = 0.65$, beginnend an der Vorderkante. Auch hier zeigt sich an allen drei Schnitten eine sehr gute qualitative Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment.

Die im Experiment über optische Marker gemessene und in der Simulation aus CAMRAD II extrahierte Blattspitzenauslenkung des Rotorblatts in Schlagrichtung wird in Abbildung 3.5 verglichen. Zur Vereinfachung der Daten wurde eine FFT durchgeführt und die Schwingung der Verformung nur mit den dominanten 1/rev- und 2/rev-Anteilen rekonstruiert, was, wie in Abbildung 3.5a zu sehen, das Rauschen der Messung vollständig entfernt, den Verlauf aber sehr gut erhält. Während in der Messung allgemein etwas größere Auslenkungen erreicht werden, ist

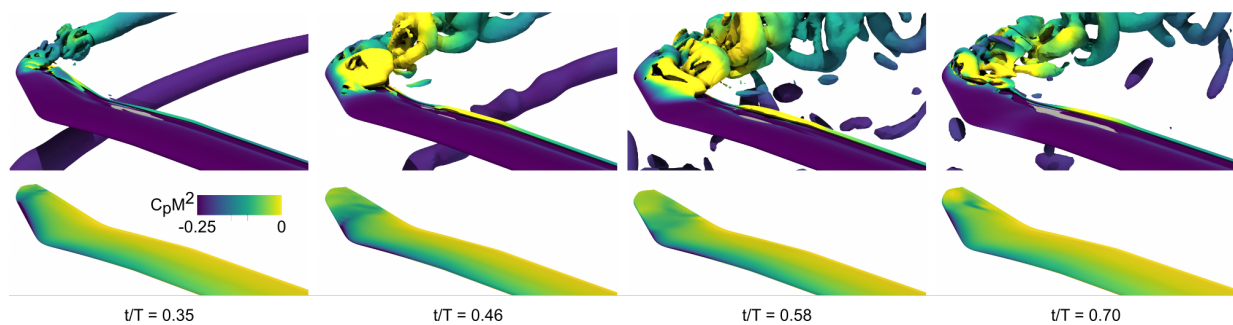


Abbildung 3.3: Wirbelvisualisierung (oben) und Oberflächendrücke (unten) in Simulation zu mehreren Zeitpunkten im Dynamic Stall-Zyklus.

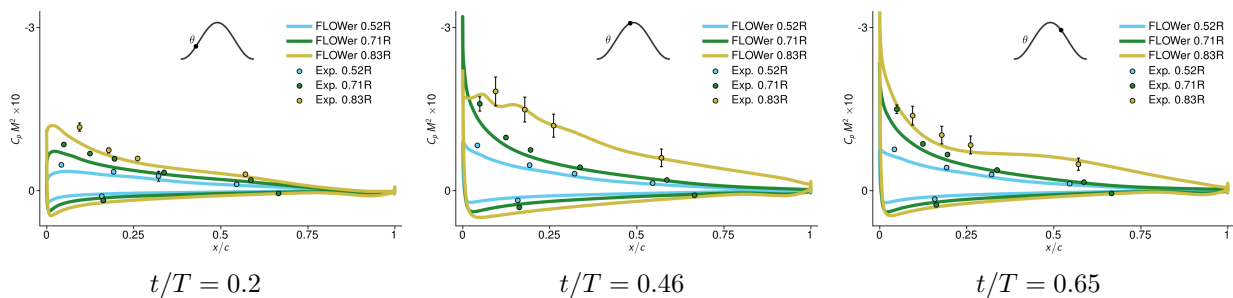


Abbildung 3.4: Vergleich von Oberflächendrücken zwischen Experiment und Simulation an drei radialen Schnitten zu drei Zeitpunkten im Dynamic-Stall-Zyklus.

der qualitative Verlauf sehr ähnlich zur Simulation. Die größte Auslenkung wird noch vor dem oberen Umkehrpunkt der Einstellwinkelschwingung erreicht, was zeitlich mit dem Maximum des berechneten integralen Schubs eines Rotorblatts korreliert. Die Auslenkung folgt primär also ohne Phasenversatz der Anregung durch den aerodynamischen Auftrieb, was aufgrund der großen Steifigkeit des Blatts und damit einhergehenden großen Schlageigenfrequenz plausibel erscheint. Wie in Abbildung 3.5b zu sehen, überschätzt die Simulation den Spitze-zu-Spitze-Wert der Auslenkung minimal. Auch der 1/rev-Anteil ist in der Simulation etwas größer, jedoch gleichphasig zum Experiment, während die Amplitude des 2/rev-Anteils sehr gut und nur mit kleiner azimuthaler Phasenverschiebung getroffen wird.

Die abgeschätzte induzierte Anstellwinkeländerung, die sich in der Simulation aus der Schlagbewegung ergibt, ist allgemein sehr niedrig, wie in Abbildung 3.6 dargestellt. So wird der Anstellwinkel maximal um $-0,6^\circ$ im Außenbereich bei etwa $\psi = 90^\circ$, wo das Blatt am schnellsten hoch schlägt, erniedrigt. Im Bereich von $\psi = 180^\circ$ und 0° schlägt das Blatt am schnellsten abwärts, was zu einer Anstellwinkelerhöhung von maximal $0,4^\circ$ führt. Eine zusätzliche Anstellwinkeländerung wird auch durch die elastische Torsion des Rotorblatts, die in Abbildung 3.7 verglichen wird, verursacht. Die Simulation liefert hier ein etwas kleineres Zudrehen des Rotorblatts als das Experiment, bei dem eine größere, sprunghafte Streuung ohne klarem Trend vorliegt, was auf eine erhöhte Unsicherheit in der Messung hindeutet. Insgesamt wird die Übereinstimmung der Rotorblattverformung als sehr gut bewertet angesichts der vorhandenen Vereinfachungen und Abschätzungen im CSD-Modell und der Komplexität des Strömungsvorgangs.

Abschließend wurde der reine Einfluss der CFD/CSD-Kopplung untersucht. Hierzu sind in Abbildung 3.8 sektionale Lasten der Dynamic-Stall-Simulation mit starrem und elastischem Rotorblatt bei ansonsten identischen Einstellungen abgebildet. Es wird klar, dass die Lasten sehr ähnlich sind und insbesondere der durch Dynamic Stall verursachte Nickmomenteneinbruch bei $0,83R$ gleich vorhergesagt wird. Die durch die Schlagbewegung verursachte Anstellwinkelreduzierung sorgt zwar im Bereich von $t/T = 0,25$ für eine etwas niedrigere Normalkraft, insgesamt sind die Unterschiede aber so gering, dass der deutlich erhöhte Mehraufwand der Kopplung für den vorliegenden Fall nicht gerechtfertigt scheint.

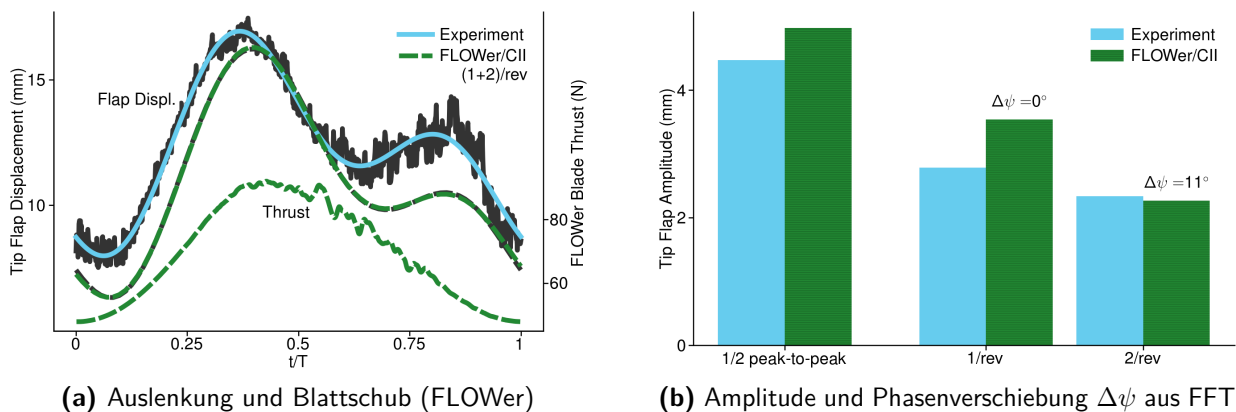


Abbildung 3.5: Vergleich der Blattspitzenauslenkung zwischen Experiment und Simulation mit Reduktion auf (1+2)/rev-Anteil bei Dynamic Stall.

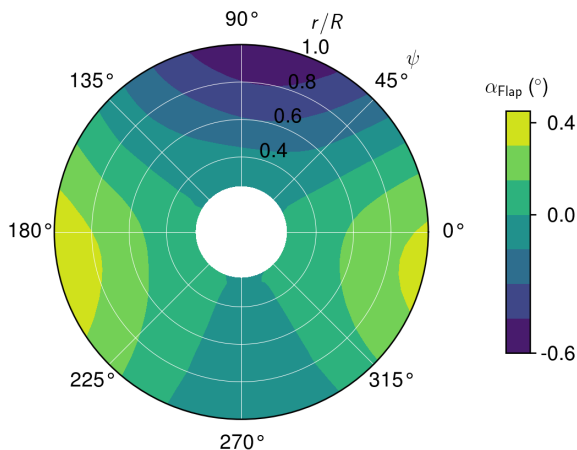


Abbildung 3.6: Durch Schlagbewegung induzierte Anstellwinkeländerung in Simulation bei Dynamic Stall.

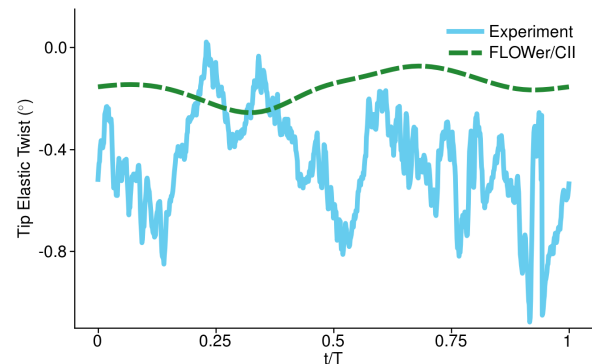


Abbildung 3.7: Vergleich der elastischen Blattspitzentorsion zwischen Experiment und Simulation bei Dynamic Stall.

3.0.2 Auswertung der experimentellen Untersuchung (DLR)

Abbildung 3.9 zeigt die an der Blattwurzel gemessenen Dynamic-Stall-Hysteresen in Biegemoment und Nickmoment (mit $\theta = 27^\circ \pm 6^\circ$ und einer Rotordrehzahl von $f = 23,6 [Hz]$). Die gemittelte (blau) Nickmomentenkurve (Abbildung 3.9 rechts) zeigt den klassischen Einbruch des Nickmoments, der bekanntermaßen durch das Abschwimmen des Dynamic-Stall-Wirbels über die Profilhinterkante verursacht wird. Auch im Biegemomentenverlauf ist das typische Überziehverhalten und der darauf folgende Auftriebseinbruch (vor Erreichen des max. Einstellwinkels) zu erkennen. In beiden Verläufen zeigt sich eine extrem große Streuung der einzelnen Perioden um den Mittelwert. Diese kann zu einem großen Teil auf das Dynamic-Stall-Phänomen und damit einhergehende Zyklus-zu-Zyklus-Variationen zurückgeführt werden. Zum anderen wirken sich auch Teststands vibrationen (zu einem kleinen Teil) auf die Streuung aus, diese werden durch leichte Unwucht sowie die starre und gelenklose Blattanbindung verursacht [16, 18].

Die Oberflächendruckverteilung (Abbildung 3.10) zum Zeitpunkt $t/T = 0,26$ zeigt in allen drei radialen Schnitten anliegende Strömung. Aufgrund der groben Diskretisierung der Drucksensoren-

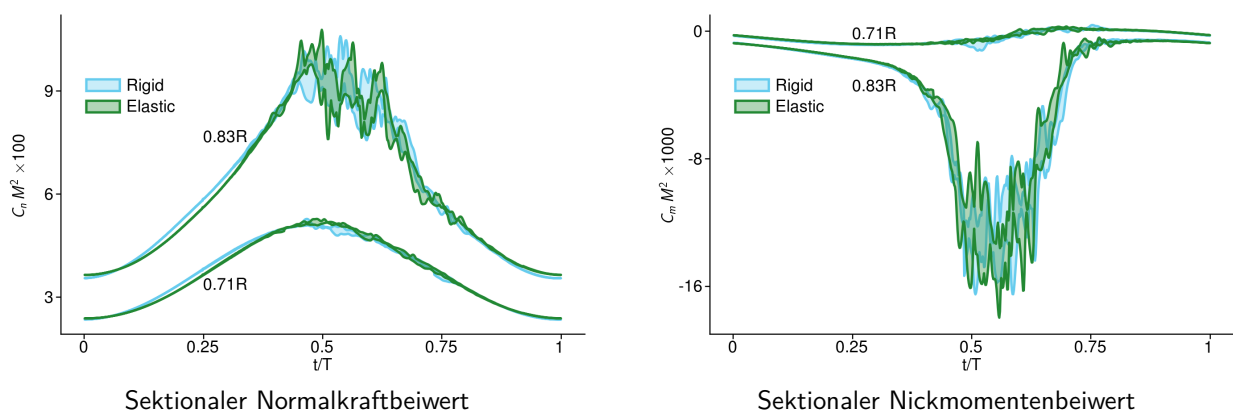


Abbildung 3.8: Vergleich simulierter Sektionallasten (Min./Max.-Einhüllende dreier Zyklen) an zwei radialen Schnitten mit starrem und elastischem Rotorblatt.

ren in Profilschnenrichtung gestaltet sich eine genauere Betrachtung der Transitionslage sowie laminar/turbulenter Bereiche als schwierig (wenn diese aus den Druckdaten bestimmt werden soll). Zum Zeitpunkt $t/T = 0,51$ (max. Einstellwinkel) deuten der einbrechende C_p -Wert sowie die hohe Standardabweichung der Drucksensoren am rückwärts gepfeilten Bereich des Rotorblattes ($0,83R$) auf abgelöste Strömung hin, wohingegen am vorwärts gepfeilten ($0,71R$) und geraden Bereich ($0,52R$) voll angelegte Strömung herrscht. Im darauf folgenden Zeitpunkt $t/T = 0,69$ (Abnickvorgang) liegt in allen drei Schnitten die Strömung bereits wieder an. Aus diesem Verhalten lässt sich ein radialer Phasenversatz im Ablösevorgang des vorwärts und rückwärts gepfeilten Rotorblattbereichs erkennen, was zu einem ungünstigen radialen Nickmomentenverlauf führen kann. Um in diesen strömungsmechanischen Vorgang einen genaueren Einblick zu erhalten, wäre es notwendig die gesamte radiale Oberflächendruckverteilung mittels TSP/PSP zu untersuchen. Dies war jedoch im Projekt zeitlich nicht mehr möglich.

Um den Zusammenhang und Phasenversatz zwischen Blattwurzelschnittkräften und Blattdeformation zu untersuchen, wurden die Blattwurzel-DMS sowie die Daten der Blattspitzenkamera synchronisiert und auf ein Referenzblatt bezogen. Dabei wurde auch überprüft, wie gut sich der qualitative Deformationsverlauf mit DMS und Blattspitzenkamera messen lässt. Bei der Schlagbewegung des Rotorblattes (siehe Abbildung 3.11 rechts) lässt sich eine gute Übereinstimmung des qualitativen Verlaufs der Blattspitzenkamera und denen der Blattwurzel-DMS erkennen. Der moderate Offset zwischen den beiden Messsystemen kann auf einen elektrischen Spannungsoffset zurückgeführt werden, der durch leichte Temperaturschwankungen des Rotorblattes zustande kommt. Zudem zeigt sich, dass es keine Phasenverschiebung zwischen Blattbiegemoment und Blattspitzendeformation gibt. Die Blattbewegung folgt dem Biegemoment ohne Phasenverschiebung. Dieses Verhalten lässt sich auf die hohe Blattsteifigkeit, den gelenklosen Blatteinbau und die hohe Schlageigenfrequenz zurückführen. Des Weiteren ist im Abnickvorgang des Deformationsverlaufs (Abbildung 3.11 rechts) bei beiden Messtechniken ein nichtlineares Verhalten zu erkennen, was sich durch ein konstantes Deformationsplateau zwischen $\psi = 250^\circ$ und $\psi = 320^\circ$ kenntlich macht. Dieser Effekt wird aller Voraussicht nach durch einen radial phasenverschobenen Wiederanlegeprozess zwischen vorwärts und rückwärts gepfeiltem Rotorblattbereich verursacht.

Der Verlauf der Blattspitzentorsion zeigt zwischen den beiden Messtechniken DMS und Blattspitzenkamera in den quantitativen Werten einen größeren Offset. Der qualitative Verlauf zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung der beiden Messtechniken (siehe Abbildung 3.11 links). Die Ursache des Offsets der quantitativen Torsionswerte liegt vermutlich an der Vorspannung und Temperaturabhängigkeit der DMS. Bei der DMS-Nickmomentenbrücke handelt es sich zwar um

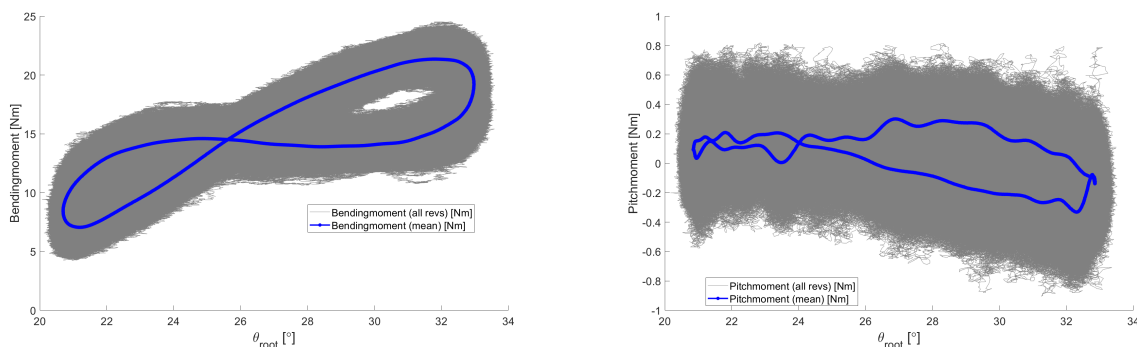


Abbildung 3.9: Streuung und Mittelwert der Blattwurzelmomente über alle Perioden für den Dynamic Stall-Zyklus.

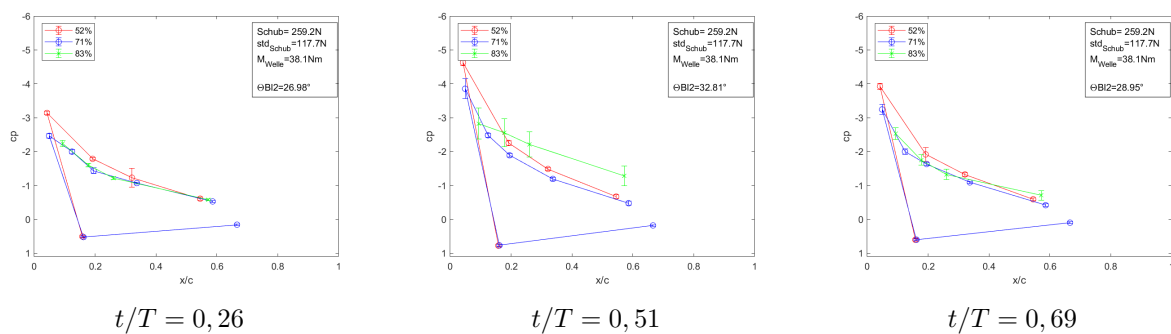


Abbildung 3.10: Oberflächendrücke aus dem Experiment an drei radialen Schnitten zu drei Zeitpunkten im Dynamic-Stall-Zyklus.

eine Vollbrückenschaltung die temperaturbedingte Werkstoffausdehnung größtenteils kompensiert, jedoch sorgt die etwas kompliziertere Querschnittsgeometrie (Wölbung, 45° -Position) für eine leichte Vorspannung durch temperaturbedingte Werkstoffausdehnung. Zusätzlich musste der Messkanal für das Nickmoment aufgrund der kleineren Dehnungen in diesem Bereich auf der größten Signalverstärkungsstufe betrieben werden. Dies führt dazu, dass selbst minimale Vorspannungen der DMS-Messbrücke zu großen Offsets führen. Jedoch ist der qualitative Verlauf der Blattspitzen-torsionsmessung von diesem Phänomen unbeeinflusst und stellt das physikalische Torsionsverhalten richtig dar. Der quantitative Offset lässt sich mit Hilfe der bekannten Vorspannung ohne größere Problem aus den Daten herausrechnen.

Betrachtet man die Blattspitzentorsion und das Nickmoment, lässt sich feststellen, dass auch hier die Blattspitzentorsion dem Nickmoment ohne Phasenversatz folgt. Dies lässt sich wie auch schon bei der Blattspitzendurchbiegung auf die hohe Modellsteifigkeit, den gelenklosen Einbau und die hohen Torsionseigenfrequenzen des Rotorblattes zurückführen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Nick- und Durchbiegungsverhalten ist, dass in Nickmoment und Blatttorsion weitaus mehr höherharmonische Frequenzanteile beteiligt sind, welche auch einen deutlich stärkeren Einfluss auf den qualitativen Nickmomenten- und Blatttorsionsverlauf haben.

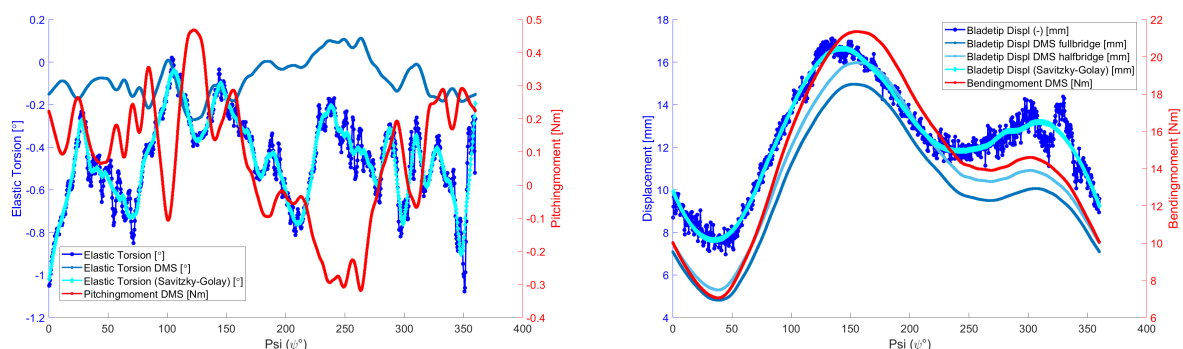


Abbildung 3.11: Blattspitzendurchbiegung, elastische Torsion, Blattbiegemoment und Torsionsmoment für den Dynamic-Stall-Zyklus.

4 Zusammenfassung

Auf Seiten des IAG wurde zunächst die numerische Prozesskette der Detached-Eddy-Simulation (DES) im Strömungslöser FLOWer verbessert. Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung und Untersuchung von verbesserten Verfahren, die den Umschaltvorgang vom RANS- in den LES-Modus steuern, um das Problem der gitterinduzierten Ablösung zu verhindern. Unerwartet im Projektverlauf war, wie schwierig sich dies bei komplexen Rotorströmungen gestaltete. Die neuartigen Ansätze, die auf unterschiedlichen numerischen und physikalischen Grundlagen basieren, lieferten letztendlich jedoch bei allen Testfällen unterschiedlichster Komplexität ein korrektes Umschalten, das heißt, dass anliegende Grenzschichtströmungen vollständig im RANS-Modus und nur stark abgelöste Strömungen im LES-Modus behandelt werden. Somit ist auch bei zukünftig immer feiner werdenden Rechengittern die sichere Anwendung einer DES möglich. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine scherschichtadaptive Filterweite im LES-Gebiet eine frühere und damit deutlich realistischere Ausbildung von Strömungsinstabilitäten nach Ablösung ermöglicht, was bei zukünftigen Simulationen zur effektiven Verminderung des Grey-Area-Problems eingesetzt werden kann.

Zur gekoppelten CFD/CSD-Simulation des DLR-Rotors wurde basierend auf statischen Deformationsmessungen des DLR ein Strukturmodell für den Hubschraubercode CAMRAD II aufgebaut. Obwohl hierbei einige Vereinfachungen gegenüber dem realen Modell getroffen wurden, konnte insgesamt eine zufriedenstellende Übereinstimmung hinsichtlich der Lasten und der Blattspitzendeformation erzielt werden, was diese Art der nun gut dokumentierten Modellerstellung für weitere Rotorblätter qualifiziert. Beim untersuchten Dynamic-Stall-Fall zeigte sich ein Ablöseverhalten, das sich deutlich von dem an einem konventionellen Rotorblatt unterscheidet, da die Doppelpfeilung die klassische Entwicklung und Ausbreitung des Dynamic-Stall-Wirbels unterdrückt und es eher zu einem Nachinnenwandern des Randwirbels kommt.

Auf Seiten des DLR wurde ein qualitativ hochwertiges und erkenntnisreiches Experiment mit doppelt gepfeilter Blattspitze durchgeführt und ausgewertet. Vor allem der Erkenntnisgewinn in Bezug auf das elastische Deformationsverhalten und den strömungsmechanischen Ablöse- und Wiederanlegevorgang ist als guter Fortschritt anzusehen. Im Projektverlauf traten während der Versuchsvorbereitung und im Experiment selbst einige Schwierigkeiten und Herausforderungen auf. Zum einen gestaltete sich die strukturelle Auslegung und der Modellbau als durchaus kompliziert, da die Modellgröße in Kombination mit der innovativen Planform und der hohen Rotordrehzahl selbst hochfeste Materialien wie kohlefaserverstärkte Kunststoffe an ihre Belastungsgrenze bringen. Auch die Implementierung einer Messmethode wie den Blattwurzel-DMS in ein rotierendes System erwies sich als herausfordernd, da sämtliche Kräfte aus der Rotation die Messtechnik beeinflussen. In der Auswertung gestaltete es sich schwierig, eine stabile Auswerterroutine für optische Messverfahren wie die Blattspitzenkamera zu entwickeln. Schlussendlich konnten jedoch alle Herausforderungen im Projekt zufriedenstellend gelöst und gute Ergebnisse im Bezug auf Datenaufzeichnung und Auswertung erzielt werden.

Durch die Experimente hat sich gezeigt, dass der elastische Deformationsverlauf (Durchbiegung) eine Nichtlinearität im Abnickvorgang aufweist. Auf Basis des Spektrums der Deformationsdaten

konnte festgestellt werden, dass die 1/rev- und 2/rev-Anteile des Rotors primär an der elastischen Blattdeformation beteiligt sind. Zudem konnte anhand der Drucksensordaten ein radial phasenverschobener Ablöse- und Wiederanlegeprozess der Strömung gezeigt werden.

Die gewonnenen Daten wurden, wie in diesem Abschlussbericht gezeigt, bereits erfolgreich zur Validierung einer FLOWer/CAMRAD II-Simulation herangezogen und sind somit für die Weiterentwicklung der numerischen Prozesskette von essentiellen Wert. Im Weiteren ist die Verwendung zur Validierung anderer gekoppelter Simulationen oder auch generell Rotorcodes denkbar. Zudem geben die Daten einen guten Einblick in die physikalische Phänomenologie des Dynamic Stalls und lassen erste Rückschlüsse auf den Planformeinfluss zu.

Literaturverzeichnis

- [1] James G. Coder. *Development of a CFD-compatible transition model based on linear stability theory*. PhD thesis, The Pennsylvania State University, January 2014.
- [2] Sébastien Deck and Nicolas Renard. Towards an enhanced protection of attached boundary layers in hybrid RANS/LES methods. *Journal of Computational Physics*, 400:108970, 2020.
- [3] Felix Frey, Johannes Herb, Johannes Letzgus, Pascal Weihing, Manuel Keßler, and Ewald Krämer. Enhancement and application of the flow solver flower. In Wolfgang E. Nagel, Dietmar H. Kröner, and Michael M. Resch, editors, *High Performance Computing in Science and Engineering ' 18*, 2019.
- [4] Andreas Goerttler, Johannes N. Braukmann, Till Schwermer, Anthony D. Gardner, and Markus Raffel. Tip-vortex investigation on a rotating and pitching rotor blade. *Journal of Aircraft*, 55(5):1792–1804, 2018.
- [5] Daniel Harlander. Numerical flow simulation of dynamic stall on a four-blade model rotor with modern blade geometry, 2019. Bachelor Thesis, Institute of Aerodynamics and Gas Dynamics, University of Stuttgart.
- [6] Kurt Kaufmann, Martin M. Müller, and Anthony D. Gardner. Dynamic stall computations of double-swept rotor blades. In Andreas Dillmann, Gerd Heller, Ewald Krämer, Claus Wagner, Cameron Tropea, and Suad Jakirlić, editors, *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII*, 2020.
- [7] Kurt Kaufmann, Philip Ströer, François Richez, Patrick Gardarein, Normann Krimmelbein, and Anthony Gardner. Validation of boundary-layer-transition computations for a rotor with axial inflow. In *Proceedings of the 75th Annual Forum of the American Helicopter Society*, 05 2019.
- [8] Leonard Kuhn. Aufbau eines Strukturmodell eines Modellrotors mit elastischen Rotorblättern in CAMRAD II zur CFD/CSD-Simulation, 2020. Bachelorarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart.
- [9] Robin B. Langtry and Florian R. Menter. Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA Journal*, 47(12):2894–2906, 2009.
- [10] Johannes Letzgus. *High-Fidelity Simulation of Dynamic Stall on Helicopter Rotors*. PhD thesis, University of Stuttgart, 2021. Datum der mündlichen Prüfung: 10.02.2021, in Druck.
- [11] Johannes Letzgus, Anthony D. Gardner, Till Schwermer, Manuel Keßler, and Ewald Krämer. Numerical investigations of dynamic stall on a rotor with cyclic pitch control. *Journal of the American Helicopter Society*, 64(1):1–14, 2019.

- [12] Johannes Letzgus, Manuel Keßler, and Ewald Krämer. Simulation of dynamic stall on an elastic rotor in high-speed turn flight. *Journal of the American Helicopter Society*, 65(2):1–12, 2020.
- [13] Johannes Letzgus, Pascal Weihing, Manuel Keßler, and Ewald Krämer. Assessment of delayed detached-eddy simulation of dynamic stall on a rotor. In Yannick Hoarau, Shia-Hui Peng, Dieter Schwamborn, Alistair Revell, and Charles Mockett, editors, *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling*, 2020.
- [14] Florian R. Menter, Martin Kuntz, and Robin Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, 4(1):625–632, 2003.
- [15] Charles Mockett, Werner Haase, and Dieter Schwamborn. *Go4Hybrid: Grey Area Mitigation for Hybrid RANS-LES Methods: Results of the 7th Framework Research Project Go4Hybrid, Funded by the European Union, 2013-2015*, volume 134. Springer, 2017.
- [16] Martin Michael Müller, Till Schwermer, Holger Mai, and Christian Stieg. Development of an innovative double-swept rotor blade tip for the rotor test facility goettingen. In *DLRK 2018 - Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, September 2018.
- [17] Till Schwermer, Anthony D. Gardner, and Markus Raffel. A novel experiment to understand the dynamic stall phenomenon in rotor axial flight. *Journal of the American Helicopter Society*, 64(1):1–11, 2019.
- [18] Till Schwermer, Kai Richter, and Markus Raffel. Development of a rotor test facility for the investigation of dynamic stall. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 132(1):663–673, 2016.
- [19] Mikhail L. Shur, Philippe R. Spalart, Mikhail Kh. Strelets, and Andrey K. Travin. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 95(4):709–737, 2015.
- [20] T. H. Skopinski, William S. Jr. Aiken, and Wilber B. Huston. *Technical Note: Calibration of strain-gage installations in aircraft structures for the measurement of flight loads*. National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.
- [21] Pascal Weihing. *Numerical Study of Transition, Flow Separation and Wake Phenomena of Wind Turbines with Enhanced Hybrid RANS/LES Methods*. PhD thesis, University of Stuttgart, 2021. To be published.
- [22] Pascal Weihing, Johannes Letzgus, Thorsten Lutz, and Ewald Krämer. Development of alternative shielding functions for detached-eddy simulations. In Yannick Hoarau, Shia-Hui Peng, Dieter Schwamborn, Alistair Revell, and Charles Mockett, editors, *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling*, 2020.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Rotorteststand Göttingen (RTG) mit doppelt-gepfeilten Rotorblättern.	5
2.2	Rotorblatt mit Querkraft- und Nickmomentenbrücke (links) und Rotorblatt (rechts) mit SPR und DMS-Biegebrücke.	5
3.1	Schnitt bei 0,77 <i>R</i> zeigt Wirkung getesteter DES-Shieldings bei RTG-Testfall, aus [10].	8
3.2	Schnitt bei 0,77 <i>R</i> zeigt rasche Ausbildung von Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten nach Hinterkantenablösung mit alternativer LES-Filterweite Δ_{SLA} beim RTG-Testfall, aus [10].	8
3.3	Wirbelvisualisierung (oben) und Oberflächendrücke (unten) in Simulation zu mehreren Zeitpunkten im Dynamic Stall-Zyklus.	9
3.4	Vergleich von Oberflächendrücken zwischen Experiment und Simulation an drei radialen Schnitten zu drei Zeitpunkten im Dynamic-Stall-Zyklus.	9
3.5	Vergleich der Blattspitzenauslenkung zwischen Experiment und Simulation mit Reduktion auf (1+2)/rev-Anteil bei Dynamic Stall.	10
3.6	Durch Schlagbewegung induzierte Anstellwinkeländerung in Simulation bei Dynamic Stall.	11
3.7	Vergleich der elastischen Blattspitzentorsion zwischen Experiment und Simulation bei Dynamic Stall.	11
3.8	Vergleich simulierter Sektionallasten (Min./Max.-Einhüllende dreier Zyklen) an zwei radialen Schnitten mit starrem und elastischem Rotorblatt.	11
3.9	Streuung und Mittelwert der Blattwurzelmomente über alle Perioden für den Dynamic Stall-Zyklus.	12
3.10	Oberflächendrücke aus dem Experiment an drei radialen Schnitten zu drei Zeitpunkten im Dynamic-Stall-Zyklus.	13
3.11	Blattspitzendurchbiegung, elastische Torsion, Blattbiegemoment und Torsionsmoment für den Dynamic-Stall-Zyklus.	13

