

DLR-IB-AE-GO-2021-215

**Messungen mit instationärer
drucksensitiver Farbe (iPSP) an der
Rotor Testanlage Göttingen (RTG)**

Martin Michael Müller

Institut für Aeroelastik



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Dokumenteigenschaften

Titel	Messungen mit instationärer drucksensitiver Farbe (iPSP) an der Rotor Testanlage Göttingen (RTG)
Betreff	-
Institut	Institut für Aeroelastik
Erstellt von	Martin Michael Müller (AE-EXT), M.Sc.
Beteiligte	Dr.-Ing. Armin Weiss (AS-EXV), Johannes Braukmann (AS-HEL), M.Sc.
Beteiligte Institute	Institut für Aeroelastik (AE), Institut für Aerodynamik und Strömungsmechanik (AS)
Freigabe von	Dr. rer. nat. Holger Mai
Datum	30.11.2021
Version	1.0
Dateipfad	-

Messungen mit instationärer drucksensitiver Farbe (iPSP) an der Rotor Testanlage Göttingen (RTG)

Zusammenfassung:

Der vorliegende Messbericht beschreibt den Versuchsaufbau sowie die Messung und Ergebnisse zu einer experimentellen Messung mit instationärer druck- und temperatursensitiver Farbe an der Rotor Testanlage Göttingen (RTG) mit doppelte-gepfeilter Blattspitze. Im folgenden werden Versuchsaufbau, gegebene Randbedingungen und eingesetzte Messtechniken beschrieben und erklärt. Anschließend werden die experimentellen Daten dargestellt und die zentralen Ergebnisse kurz erläutert.

Die Messung wurde mit einem innovativen doppel-gepfeilten Rotorblattsatz durchgeführt. Dieser wurde am Institut für Aeroelastik entwickelt und ausgelegt. Ziel des Experiment war die Untersuchung des aeroelastischen Verhalten bei Schubpolaren und unter Dynamic Stall Bedingungen.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V.

Institut für Aeroelastik

Institutsleiter:

Abteilungsleiter:

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Lorenz Tichy

Dr. rer. nat. Holger Mai

Martin Michael Müller,
M.Sc.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	viii
1 Einleitung	1
2 Rotorblattmodell	2
3 Rotor Testanlage Göttingen	4
4 Experimenteller Aufbau	5
5 Ergebnisse	8
6 Zusammenfassung	20
Literatur	21
Abbildungsverzeichnis	23
Tabellenverzeichnis	24

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

b	Breite Windkanaldüse
c	Rotorblatttiefe
f	Frequenz
h	Höhe Windkanaldüse
Ma	Machzahl
R	maximaler Rotorradius
r	Rotorradius

Griechische Buchstaben

Θ	Einstellwinkel
Ψ	Azimuth
ω	Kreisfrequenz

Subskripte

<i>Eiffel</i>	bezogen auf den Eiffel-Windkanal
<i>koll</i>	bezogen auf den kollektiv Einstellwinkel
<i>tip</i>	bezogen auf die Blattspitze
<i>rot</i>	bezogen auf Rotation
<i>zyk</i>	bezogen auf den zyklischen Einstellwinkel

1 Einleitung

Durch ihre Fähigkeit in der Luft zu schweben (hovern) und von diesem Punkt aus in nahezu alle Richtungen fliegen zu können, haben Hubschrauber ein sehr breites Einsatzspektrum. Dieses reicht von Rettungsmissionen bis hin zu Gütertransport in schwer zugänglichem Gelände. Diese Missionsvielfalt macht den Hubschrauber als Fluggerät einzigartig. Auf der anderen Seite weisen Hubschrauber jedoch hohe Komplexität in Bezug auf Strukturmechanik, Aerodynamik, Avionik und Aeroelastik auf. Vor allem am Hauptrotor treten eine Vielzahl von aerodynamischen und aeroelastischen Phänomenen auf (z.B. Dynamic Stall, Verdichtungsstöße, Queranströmung, Blatt-Wirbel-Interaktion). Eines dieser Phänomene ist der sogenannte Dynamic Stall, welcher zu hohen Nick- und Biegemomenten an der Rotorblattwurzel führt und somit den Flugbereich eingrenzt.

Dynamic Stall tritt bei Hubschraubern im Vorwärts und Manöver Flug am rücklaufenden Rotorblatt bei hohem Einstellwinkel auf. Die Rotor Testanlage Göttingen (RTG) bietet hier die Möglichkeit diese Phänomene möglichst isoliert, von anderen aerodynamischen Hauptrotoreffekten, zu untersuchen. Dabei erreichen die Rotorblätter im rotierenden System realistische Blattspitzenmachzahlen vom $Ma = 0.285 - 0.305$. Um den Dynamic Stall zu hervorzurufen wird eine Taumelscheibe verwendet, die jedes Rotorblatt zu einer zyklischen Nickschwingung um die $c/4$ -Achse anregt.

Für das im folgenden beschriebene Dynamic Stall Experiment mit doppelt-gepfeilter Blattspitze, wurde der RTG bei einer Rotationsfrequenz von $f_{rot} = 23,6 Hz$ betrieben. Bei dem Rotor handelt es sich um eine 4-Blatt Konfiguration ohne Anströmung in Flugrichtung.

2 Rotorblattmodell

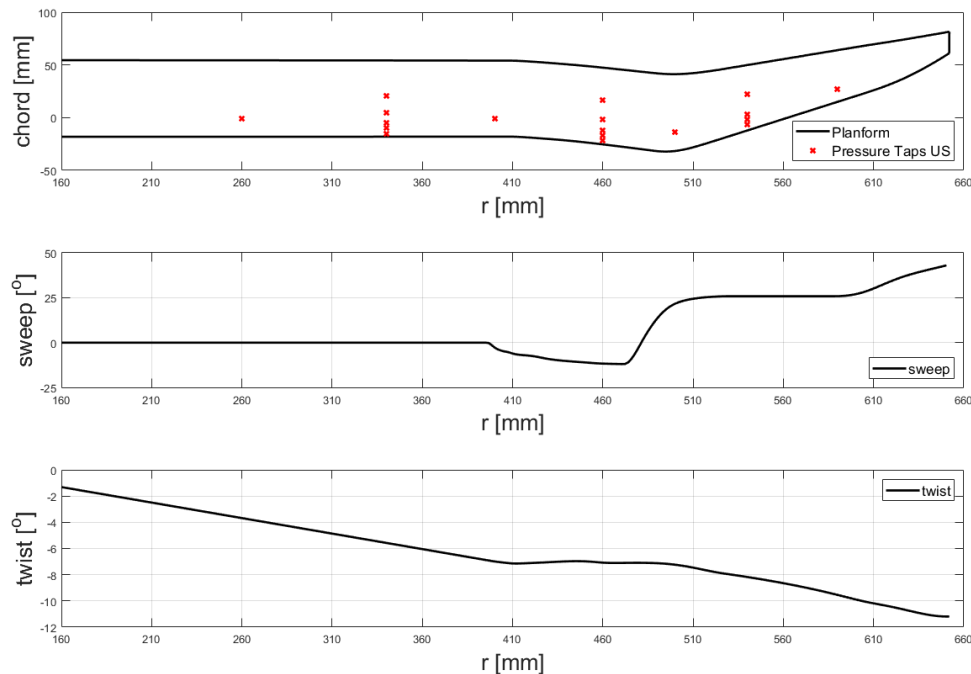


Abbildung 2.1: Planform, Verwindung, Pfeilung und Drucksensorposition [1].

Die primären geometrischen Konstruktionsparameter eines Hubschrauberblattes umfassen radiale Verwindung (twist), Pfeilung (sweep) und grundlegende Planform. Diese Größen, sowie die Positionierung der instationären Drucksensoren auf der Blattoberseite, sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Aufgrund des Rotorradius von $R = 652\text{mm}$ und dem Beginn des ersten Profilschnittes bei $r = 160\text{mm}$, wurde der in Abb. 2.1 dargestellte radiale Ausschnitt gewählt. Die Rotorblattinstrumentierung umfasst 22 instationäre absolut Drucksensoren (relativ gekapselt bei 76500kPa) verteilt auf 7 radiale Schnitte. 18 auf der Blattoberseite und 4 auf der Blattunterseite ($2 \times r = 340\text{mm}$ und $2 \times r = 460\text{mm}$). Zudem befindet sich bei $r = 430\text{mm}$ und $c/2$ in der Unter- und Oberschale je ein PT100 - Temperatursensor direkt unter der Blatthaut. Die an der Blattwurzel aufgeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS) werden für die Messung der integralen Blattschnittkräfte und -momente verwendet. Für die Experimente wurden 2 DMS-Vollbrücken (Querkraft in Auftriebsrichtung und Nickmoment) und eine DMS-Halbbrücke (Wurzelbiegemoment) bei $r = 204\text{mm}$ auf die Blatthaut geklebt (siehe Abb.2.2). Die Kalibrierung der einzelnen DMS-Brücken wurde mit Hilfe von Profilschablonen an drei radialen Schnitten durchgeführt. Mittels Umlenkrollen wurden dann entsprechende kombinierte (Biegetorsionsmoment) und isolierte (reines Biegemoment) Flächenlasten aufgeprägt. Zusätzlich wurde bei diesem Vorgang die elastische Achse der Rotorblätter bestimmt. Für die Kalibrierung des Nickmomentes wurden an den Profilschablonen entsprechende Ausleger angebracht, damit konnte ein isoliertes Nickmoment

aufgebracht werden.

Um alle sechs Kräfte und Momente am Rotorkopf zu messen wurde eine piezoelektrische Waage verwendet. Diese ist unter den ersten beiden Radiallagern der Rotorwelle positioniert, misst den Gesamtschub und wird für die dynamische Wuchtung des Rotors verwendet. Des Weiteren ist jedes Blattlager mit einem *PT100*-Temperatursensoren und einem Hallsensor (Einstellwinkelmessung) ausgestattet. Für die Messung der Blattspitzendeformation wurden bei jedem Rotorblatt zwei

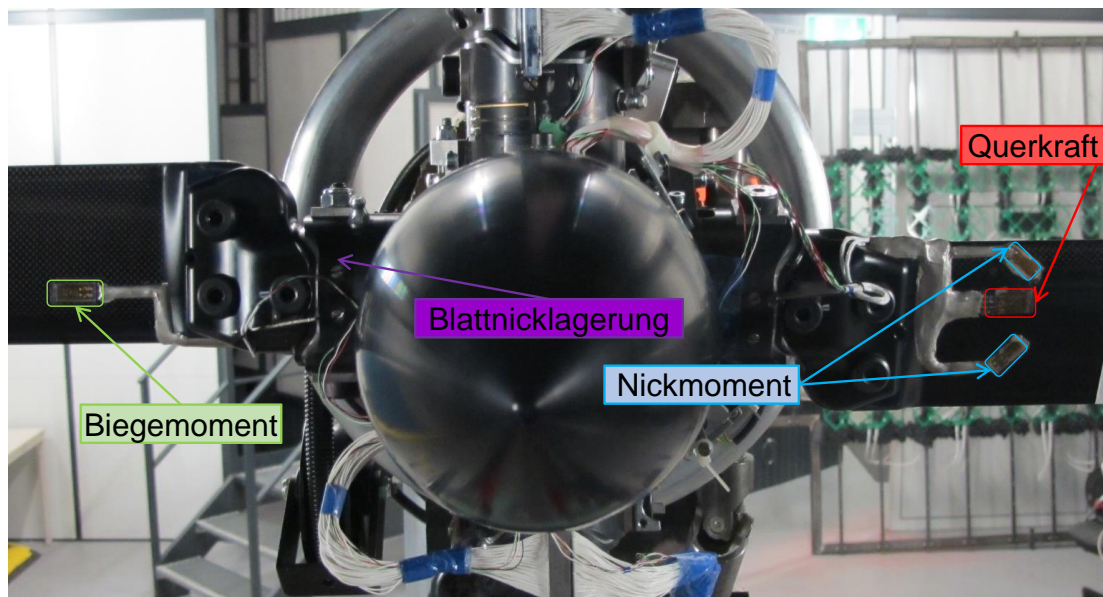


Abbildung 2.2: DMS an der Blattwurzel für Querkraft, Nick- und Biegemoment

retroreflektierende Marker auf die Stirnseite der Blattspitze geklebt. Der Nasenmarker wurde so nah wie möglich an der Profilnase positioniert und der Hinterkantenmarker soweit wie möglich an der Hinterkante. Der Durchschnittliche Abstand der beiden Marker beträgt 8 mm. Über einen Nickzyklus werden ca.1600 Blattspitzenbilder aufgenommen. Das entspricht einer azimuthalen Auflösung von $\Psi = 0.225^\circ$. Mittels eines Referenzbildes bei stehendem Rotor kann somit die Blattspitzendeformation ermittelt werden.

3 Rotor Testanlage Göttingen

Im folgenden werden Aufbau und Hauptmerkmale der Rotor Testanlage Göttingen (RTG) kurz erläutert. Der Schematische Aufbau des RTG ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die Rotor Testanlage untergliedert sich in folgende Bestandteile: 1. Öffnung für die Außenluftansaugung, 2. Windkanal nach Eiffel Bauart, 3. Rotor Teststand, 4. Messwarte, Ausblasungsöffnung und Lichtfang. Um Rezirkulation in der Anlage zu vermeiden, erfolgt die Außenluftansaugung und -ausblasung durch den Eiffel-Windkanal in getrennten Räumen. Aufgrund der Verwendung von optischen Messsystemen wie particle image velocimetry (PIV), Blattspitzenkamera (BS) oder Background Oriented Schlieren (BOS) muss das einfallende Licht der Ausblasungsöffnung durch ein Lichtfang reduziert werden. In Tabelle 1 sind die Hauptmerkmale der Rotor Testanlage Göttingen aufgeführt.

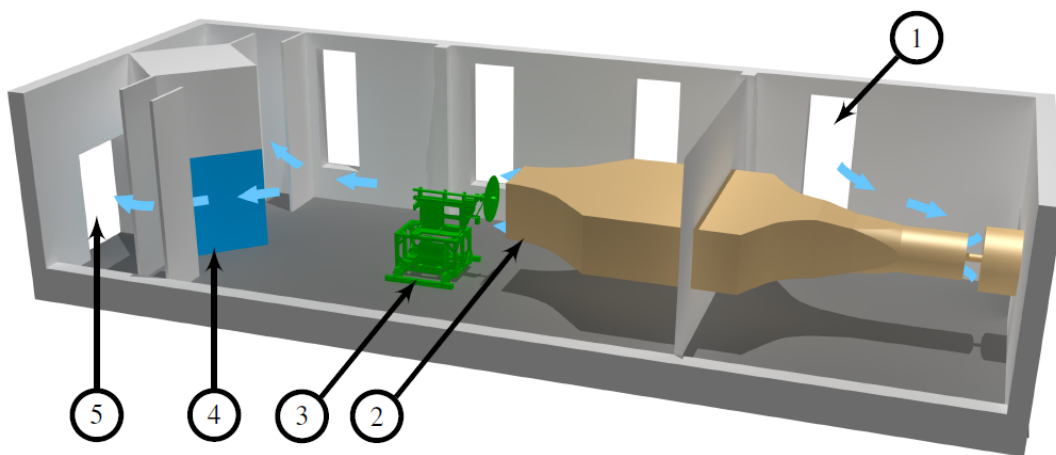


Abbildung 3.1: Rotor Testanlage Göttingen (RTG) [2].

Die Rotor Rotationsfrequenz ist hier zugleich auch die Nickfrequenz der Rotorblätter. Zudem ist zu beachten, dass eine Rotationsfrequenz von $f_{rot} = 65$ Hz nur im Überlastversuch erreicht wird und die max. Rotationsfrequenz im Betrieb $f_{rot} = 50$ Hz beträgt, was einer $Ma_{tip} = 0.6$ entspricht.

Tabelle 1: Hauptmerkmale der Rotor Testanlage Göttingen

Merkmale	Bereich
Rotationsfrequenz (f_{rot})	0 - 65 [Hz]
Max. Rotorradius (r)	0.65 [m]
Blattzahl	2 oder 4 [-]
Maße Windkanal (b x h)	3.4 x 1.6 [m]
Blattspitzenmachzahl (Ma_{tip})	0.3 - 0.72 [-]
Machzahl Windkanal (Ma_{Eiffel})	0.03 - 0.04 [-]

4 Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Versuchsaufbau ist in Abb. 4.1 dargestellt. Dieser umfasst eine Hochgeschwindigkeitskamera und LED für Blattspitzenaufnahmen, eine Prandtlsonde zur Messung der axialen Einströmgeschwindigkeit, Lichtschnittoptik, Laser und CCD-Kamera für iPSP und iTSP aufnahmen.

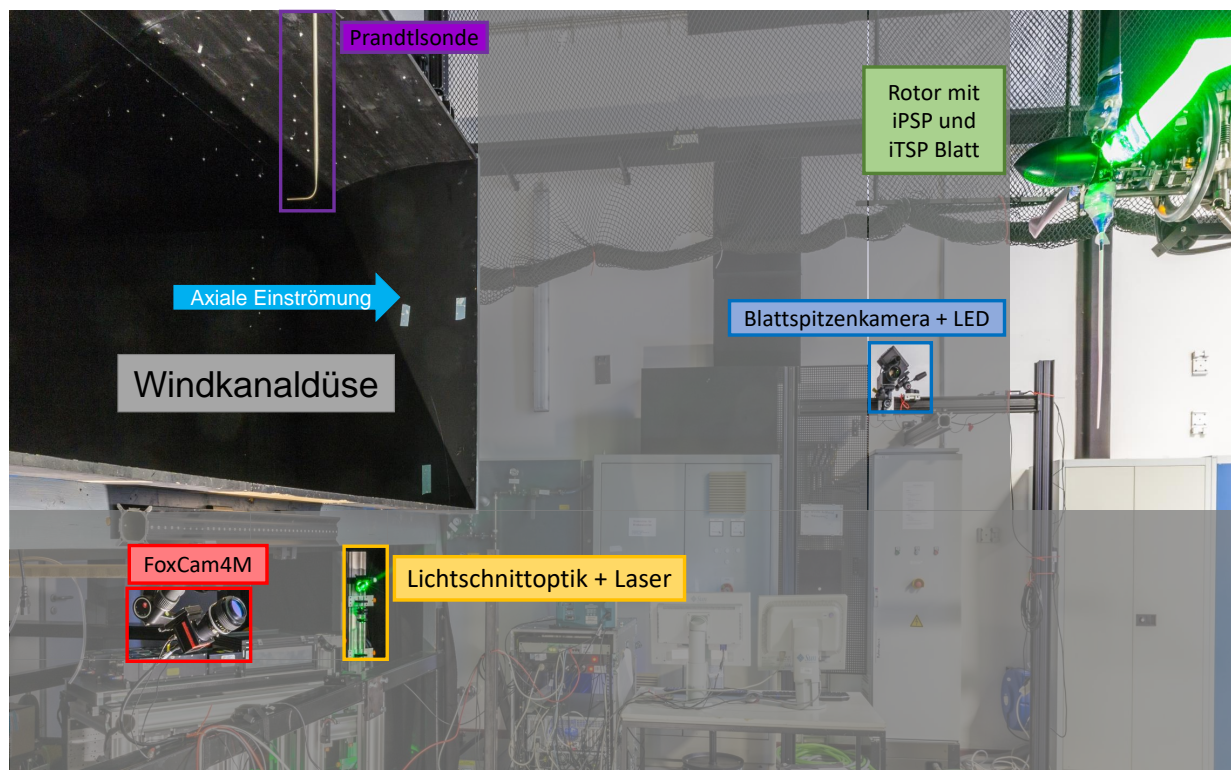


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Versuchsaufbaus.

Die Triggerung der optischen Systeme (Laser, Kameras, LED) erfolgt über einen Drehgeber am Ende der Rotorwelle. Dieser unterteilt eine azimutale Umdrehung in 1024 Inkremente. Somit ist es möglich optischen Messsysteme auf einen Azimuthwinkel von $\Psi = 0.352^\circ$ genau zu triggern.

Um die gesamte Nickschwingung eines Rotorblattes durch ein Raumfestes azimutales Messfenster drehen zu können, verfügt der Rotor Teststand über eine Mechanik, welche den stationären Teil der Taumelscheibe einmal um 360° drehen kann. Dies ist im laufenden Betrieb bei jeder Rotationsfrequenz möglich. Daraus ergibt sich der Vorteil, das der Sichtbereich von optischen Messsystemen fest auf eine azimutale Position ausgerichtet werden kann und nicht mehr umgebaut werden muss.

Das gesamte Messprogramm mit ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Art der Messpunkte unterteilt sich in zyklisch und kollektiv. Bei zyklischen Messpunkten weisen alle Rotorblätter einen gleichen gemeinsamen Kollektiveinstellwinkelwinkel auf, um den eine zyklischen Nickschwingung, mit

entsprechender Amplitude, ausgeführt wird. Bei kollektiv Messpunkte weisen die Blätter nur einen gemeinsamen Einstellwinkel (Θ) auf, ohne zyklische Amplitude.

Alle Messpunkte wurden bei einer Rotationsfrequenz von 23,6 Hz und einer axialen Anströmung von $2,1 \frac{m}{s}$ ($600 \frac{U}{min}$ Windkanaldrehzahl) aufgezeichnet. Der Einstellwinkel (Θ) wird an der Blattwurzel gemessen und bezieht sich auf die beiden parallelen Außenflächen der Blatteinspannung.

Tabelle 2: Messprogramm iPSP

Messpunkt	Art	kollektiv (Θ_{koll}) [°]	zyklisch (Θ_{zyk}) [°]
C01_S001_0001_3	kollektiv	17	–
C01_S001_0001_4	kollektiv	17	–
C01_S001_0002_3	kollektiv	17	–
C01_S001_0002_4	kollektiv	17	–
C01_S001_0003_3	zyklisch	17	8
C01_S001_0004_3	kollektiv	17	–
C01_S001_0005_3	zyklisch	17	8
C01_S001_0006_3	zyklisch	24	6
C01_S001_0007_3	zyklisch	27	6
C01_S001_0008_3	zyklisch	27	6
C01_S001_0009_3	zyklisch	27	6
C01_S001_0010_3	zyklisch	30	6
C01_S001_0011_3	zyklisch	32	6
C01_S002_0001_3	kollektiv	22	–
C01_S002_0002_3	kollektiv	22	–
C01_S002_0003_3	kollektiv	6	–
C01_S002_0004_3	kollektiv	7	–
C01_S002_0005_3	kollektiv	8	–
C01_S002_0006_3	kollektiv	9	–
C01_S002_0007_3	kollektiv	10	–
C01_S002_0008_3	kollektiv	11	–
C01_S002_0009_3	kollektiv	12	–
C01_S002_0010_3	kollektiv	13	–
C01_S002_0011_3	kollektiv	14	–
C01_S002_0012_3	kollektiv	15	–
C01_S002_0013_3	kollektiv	16	–

C01_S002_0014_3	kollektiv	17	–
C01_S002_0015_3	kollektiv	18	–
C01_S002_0016_3	kollektiv	19	–
C01_S002_0017_3	kollektiv	20	–
C01_S002_0018_3	kollektiv	21	–
C01_S002_0019_3	kollektiv	22	–
C01_S002_0020_3	kollektiv	23	–
C01_S002_0021_3	kollektiv	24	–
C01_S002_0022_3	kollektiv	24	–
C01_S002_0023_3	kollektiv	25	–
C01_S002_0024_3	kollektiv	26	–
C01_S002_0025_3	kollektiv	27	–
C01_S002_0026_3	kollektiv	28	–
C01_S002_0027_3	kollektiv	29	–
C01_S002_0028_3	kollektiv	30	–
C01_S002_0029_3	kollektiv	31	–
C01_S002_0030_3	kollektiv	32	–
C01_S002_0031_3	kollektiv	33	–
C01_S002_0032_3	kollektiv	34	–
C01_S002_0033_3	kollektiv	35	–
C01_S002_0034_3	kollektiv	36	–
C01_S002_0035_3	kollektiv	37	–
C01_S002_0036_3	kollektiv	38	–
C01_S002_0037_3	kollektiv	24	–

5 Ergebnisse

Im folgenden werden die zentralen Ergebnisse der RTG-Messung mit instationärer drucksensitiver Farbe kurz dargestellt und zentralen Ergebnisse kurz erläutert. Dazu werden die instationären Oberflächendruckverteilungen, Blattspitzenverformungen und die integralen Blattlasten betrachtet. Es wird jeweils immer nur ein Messpunkt einer zyklischen Konfiguration, sowie die der kollektiven Blattpolaren dargestellt.

In den Abbildungen 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, und 5.6 sind die oben genannten Größen für den zyklischen Fall $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$ dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden für die instationäre Oberflächendruckverteilungen nur vier signifikante Phasenlagen ausgewählt und dargestellt. Die Oberflächendruckverteilung wird für alle Messpunkte radial als $C_p Ma^2$ aufgetragen.

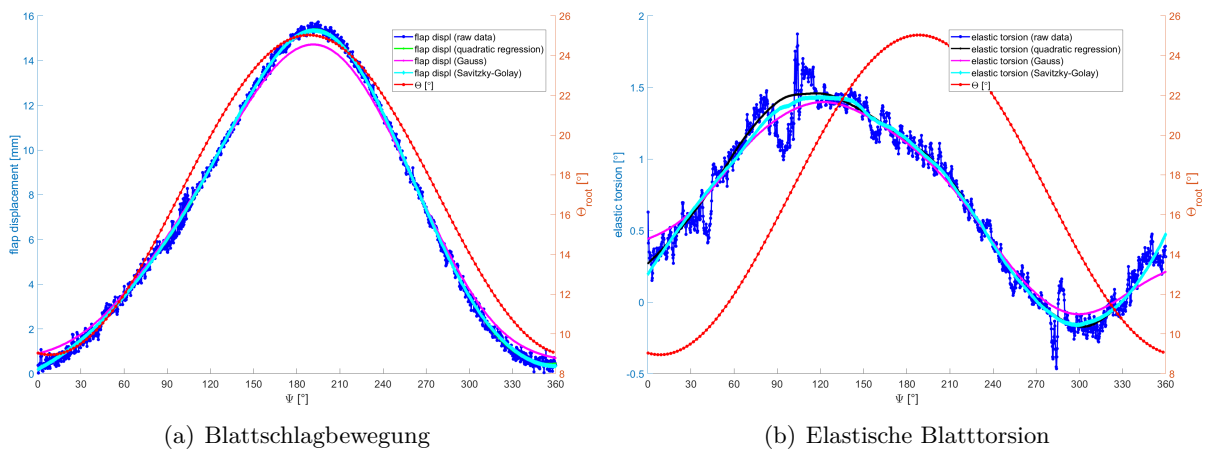


Abbildung 5.1: Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$.

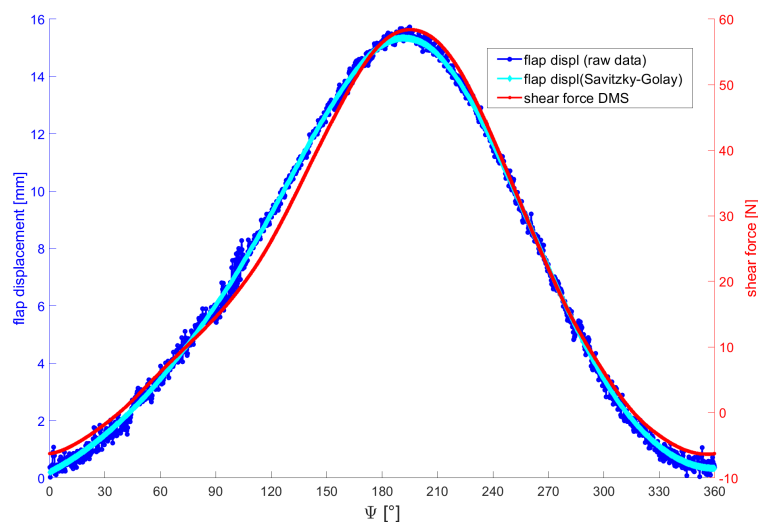


Abbildung 5.2: Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$

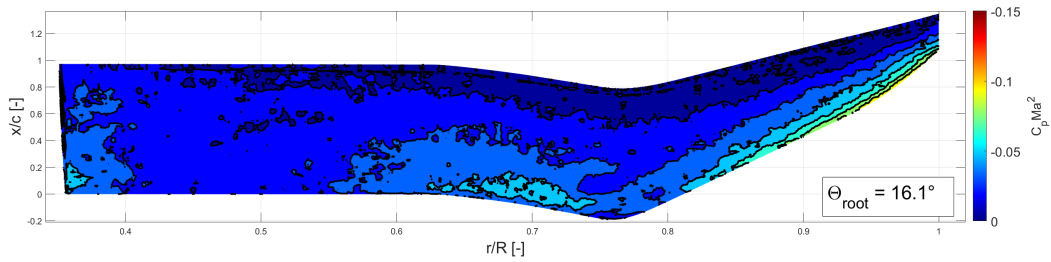


Abbildung 5.3: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$

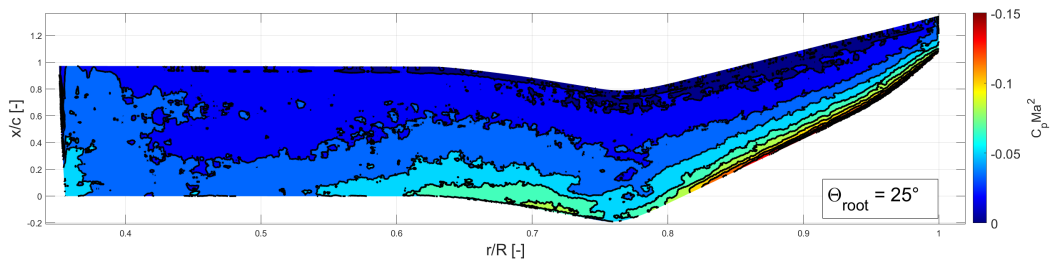


Abbildung 5.4: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$

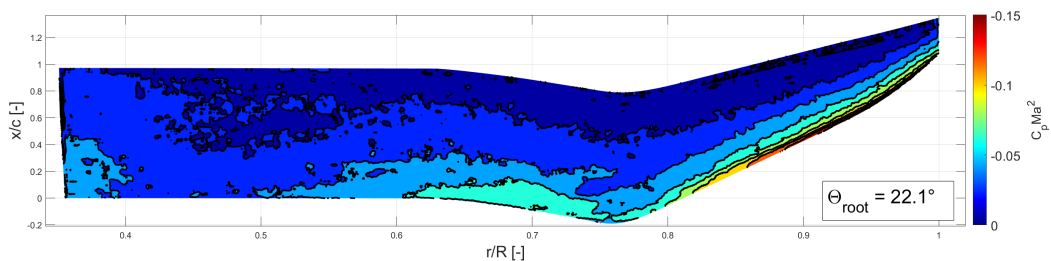


Abbildung 5.5: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$

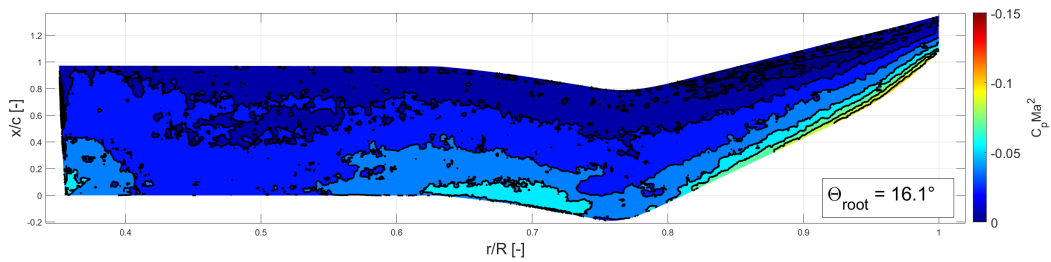


Abbildung 5.6: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$

In den Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, und 5.12 sind die Ergebnisse für den zyklischen Fall $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$ dargestellt. In Abbildung 5.7 (a) lässt sich die Ausprägung eines Sattelpunktes im Abnickvorgang der Blattspitzenschlagbewegung erkennen. Dieses Verhalten ist in der Blattspitzenschlagbewegung für den Fall $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$ nicht zu sehen (siehe Abb. 5.1 (a)). Im Bezug auf die elastische Blattspitzentorsion lassen sich zwischen diesen beiden zyklischen Fällen keine signifikanten Unterschiede im qualitativen Verlauf ausmachen (vergleiche Abb. 5.1 (b) und 5.7 (b)). Lediglich die quantitativen Werte bezüglich maximaler elastische Blattspitzentorsion unterscheiden sich bei den beiden zyklischen Fällen. In den Abbildungen 5.2 und 5.8 lässt sich in beiden Fällen erkennen, dass zwischen Blattspitzenschlagbewegung und Querkraft in Auftriebsrichtung nahezu kein Phaseversatz im Azimuth auftritt. Dies deutet darauf hin, dass von einem ideal steifen Rotorblatt ausgegangen werden kann.

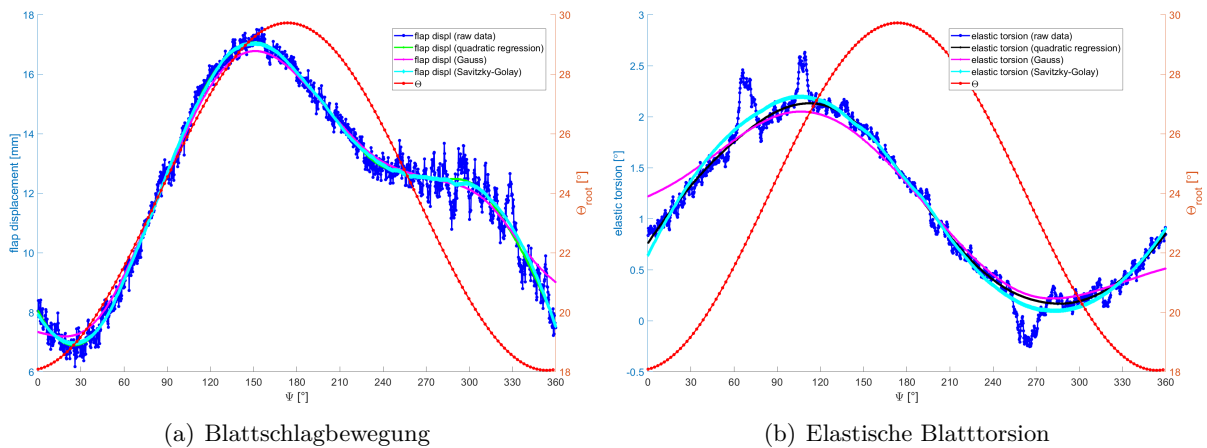


Abbildung 5.7: Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$.

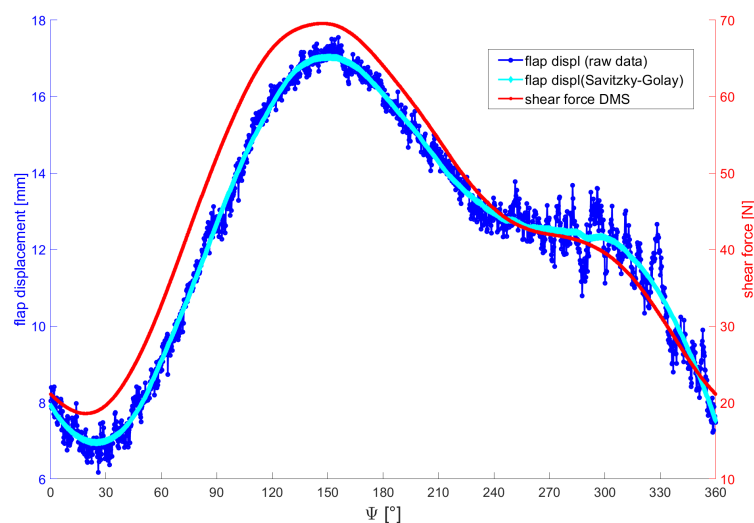


Abbildung 5.8: Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$

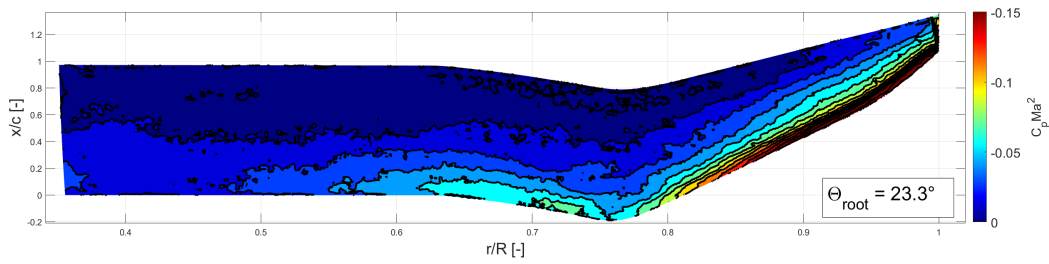


Abbildung 5.9: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$

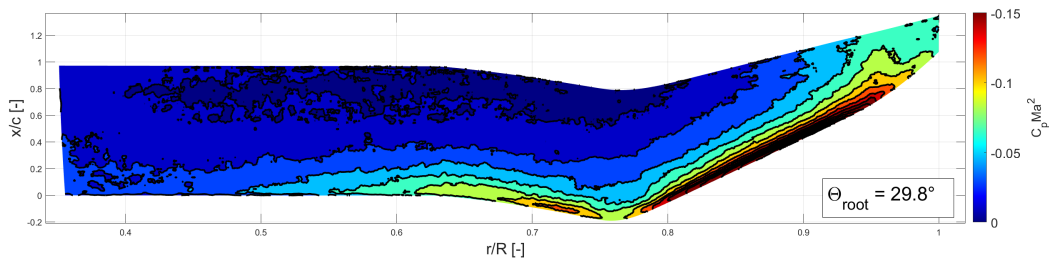


Abbildung 5.10: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$

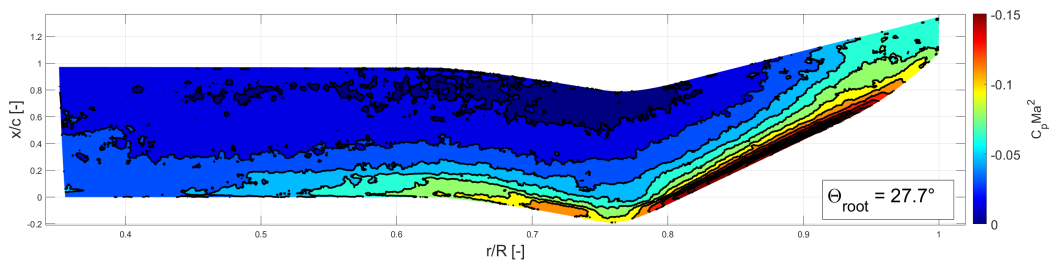


Abbildung 5.11: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$

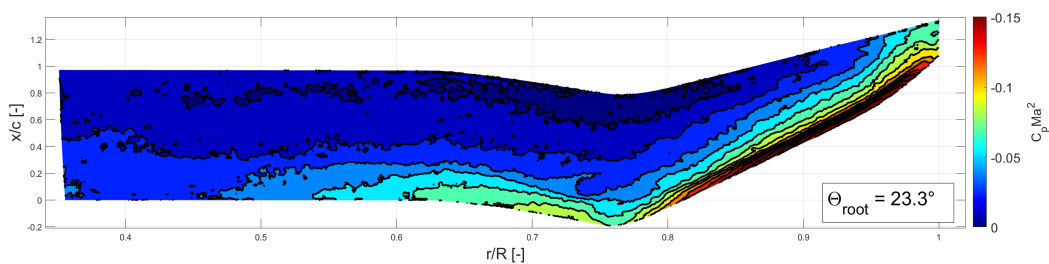


Abbildung 5.12: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$

In den Abbildungen 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, und 5.18 sind die Ergebnisse für den zyklischen Fall $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$ dargestellt. Auch für diesen zyklischen Fall zeigt die Blattspitzenschlagbewegung 5.13 (a) einen Sattelpunktes im Abnickvorgang. Allerdings zeigt sich, dass die Ausprägung des Sattelpunktes qualitativ deutlich stärker ist im Vergleich zu 5.7 (a). Für den Fall $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$ kann von einem erneuten abgeschwächten Wiederaufschlagen der Blattspitzen im Abnicken gesprochen werden. Die Ausprägung des Sattelpunktes in der Blattschlagbewegung lässt sich auf den azimuthal Phasenverschobenen aerodynamischen Ablöse- und wiederanlageprozess auf dem vorwärts und rückwärts gepfeilten Bereich des Rotorblattes zurückführen. Betrachtet man die integralen Blattlasten in Abbildung 5.14 lässt sich erkennen, dass es auch hier nahezu keinen Phasenversatz zwischen Blattschlagbewegung und integraler Querkraft in Auftriebsrichtung gibt.

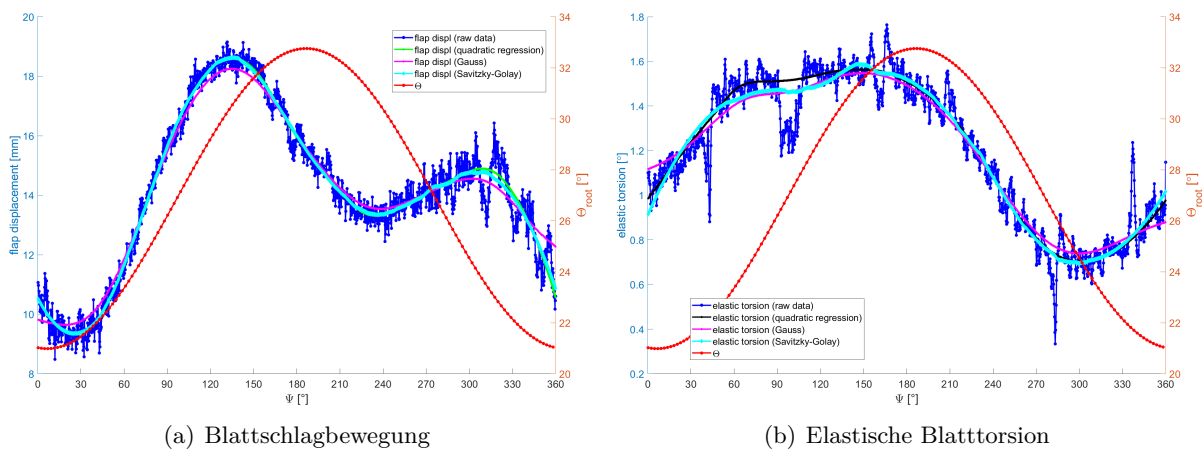


Abbildung 5.13: Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$.

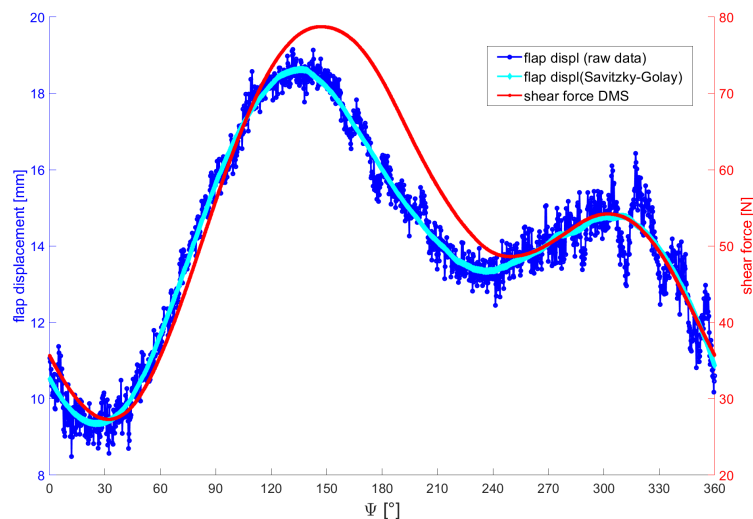


Abbildung 5.14: Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$

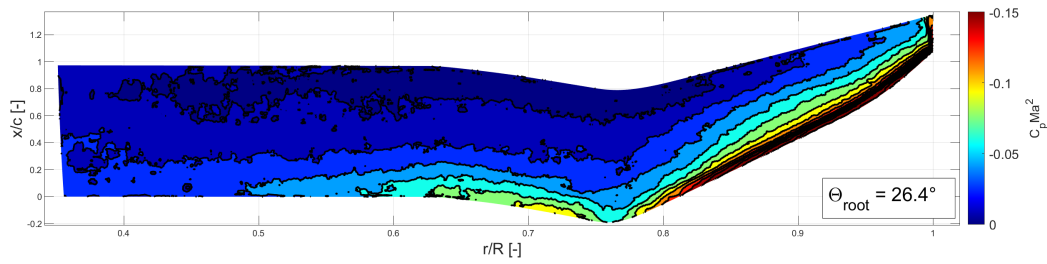


Abbildung 5.15: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$

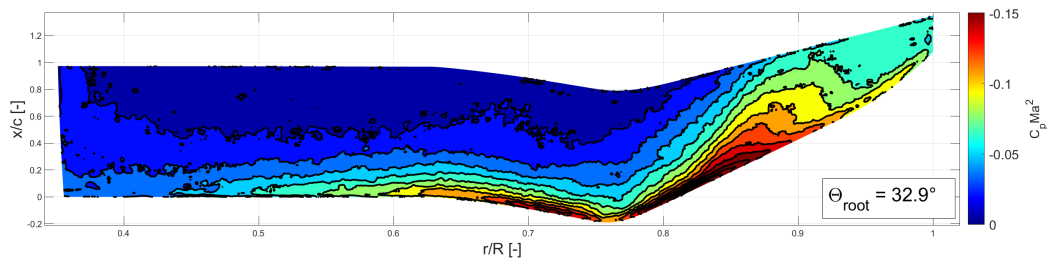


Abbildung 5.16: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$

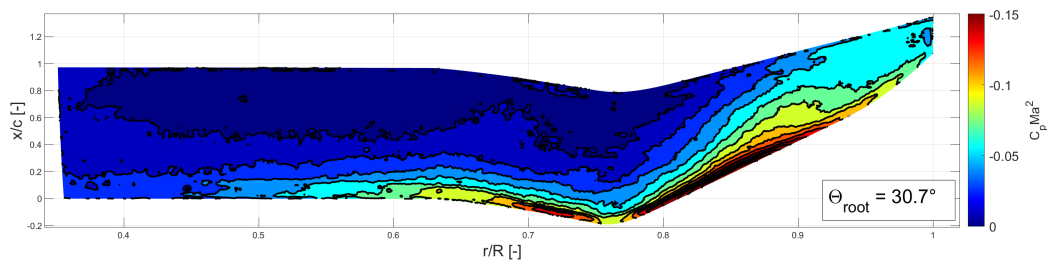


Abbildung 5.17: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$

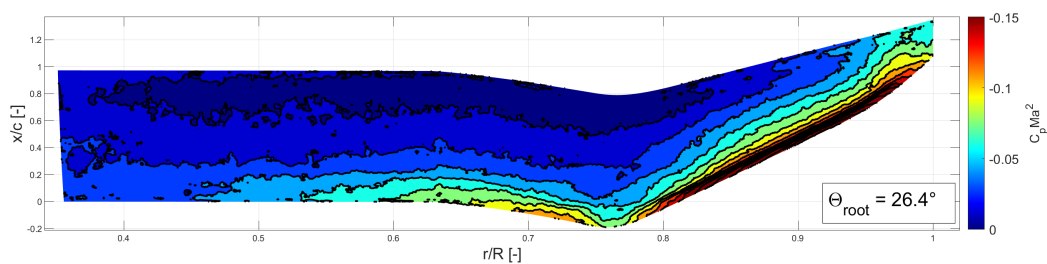


Abbildung 5.18: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$

In den Abbildungen 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, und 5.24 sind die Ergebnisse für den zyklischen Fall $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$ dargestellt. Wie auch schon bei den zyklischen Fällen $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$ und $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$ lässt sich ein Sattelpunkt im Abnicken der Blattspitzenschlagbewegung erkennen. Für diesen Fall zeigt sich jedoch eine signifikante Abschwächung (siehe Abb. 5.19 (a)). Dies resultiert zum einen, aus einer generell stärkeren Grunddurchbiegung durch einen höheren Kollektivwinkel und zum anderen aus einer etwas geringeren Amplitude durch den zyklischen Anteil. Somit sinkt die effektive Amplitude zwischen Grunddurchbiegung und zyklischem Anteil und schwächt den Sattelpunkt ab.

In den bisher betrachteten zyklischen Fällen korreliert Blattspitzenschlagbewegung sehr gut mit der integralen Querkraft in Auftriebsrichtung, wie auch in diesem Fall (siehe Abb.5.20).

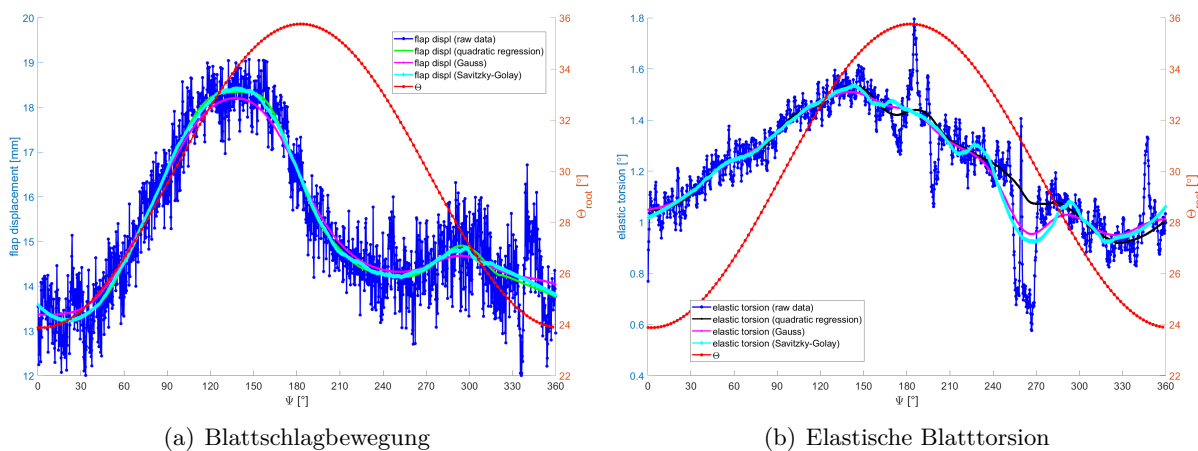


Abbildung 5.19: Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$.

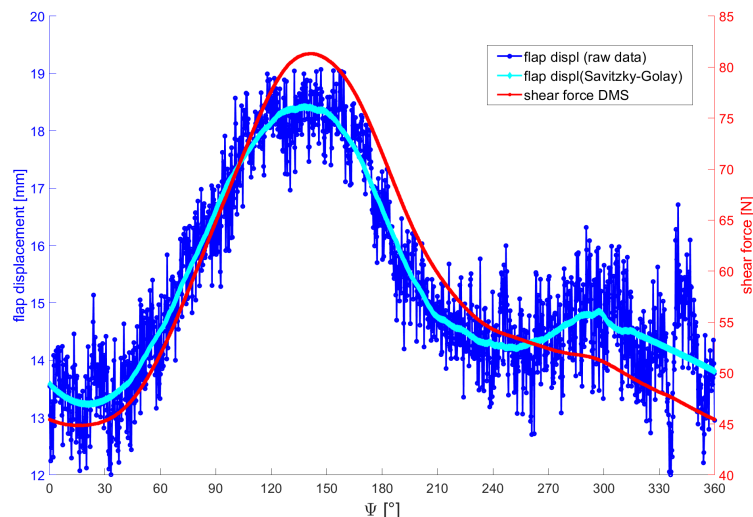
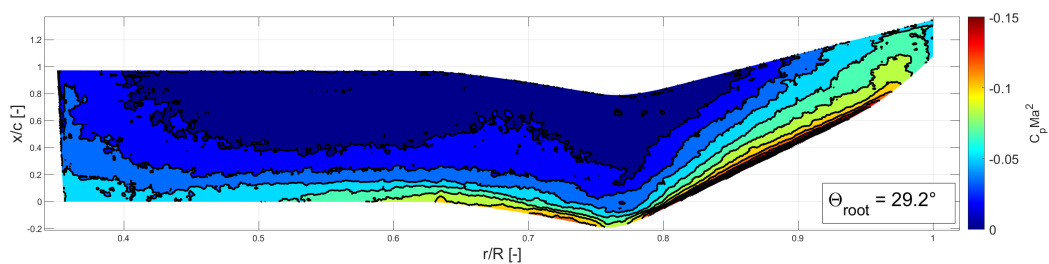
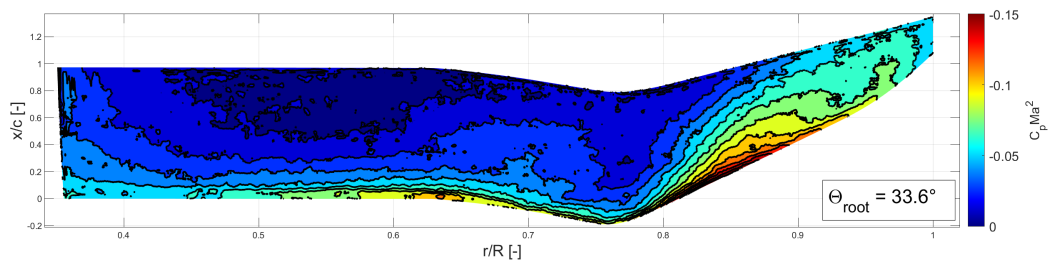
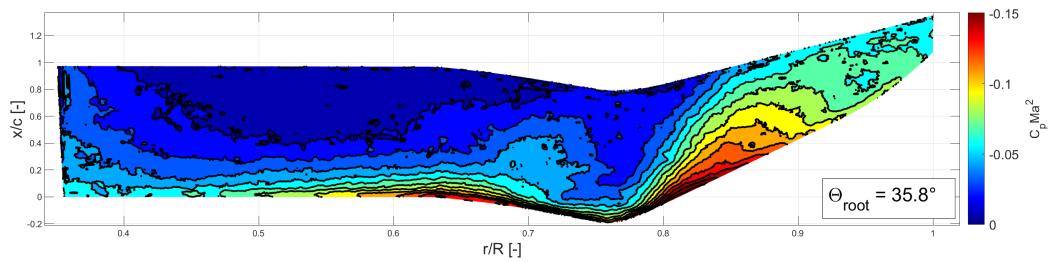
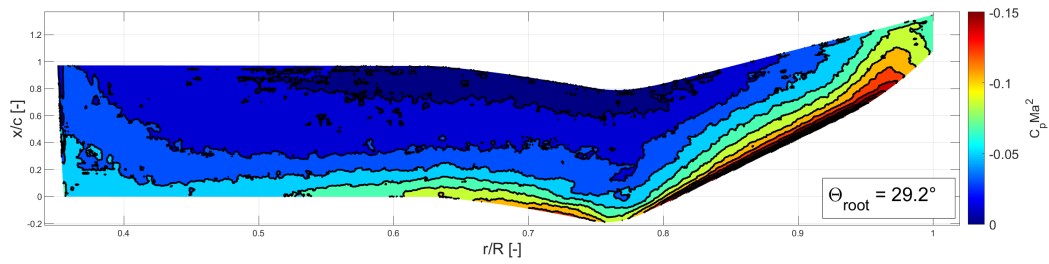
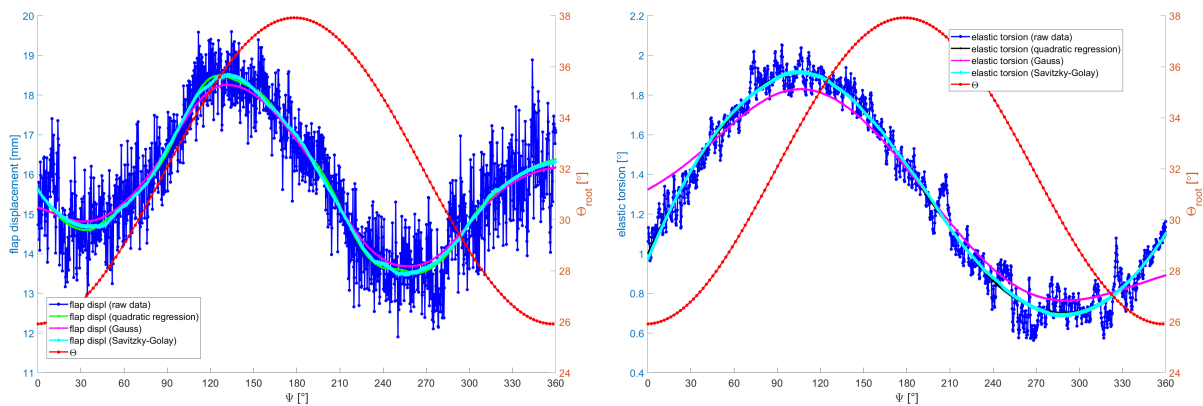


Abbildung 5.20: Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$



In den Abbildungen 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, und 5.30 sind die Ergebnisse für den zyklischen Fall $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$ dargestellt. Für diesen Fall ist zu erkennen, dass die Blattspitze mit nahezu zweifacher Anregungsfrequenz schlägt (siehe Abb. 5.25 (a)). Wie auch schon für den Fall $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$ zeigt sich, dass die generelle Grunddurchbiegung durch einen höheren Kollektivwinkel zunimmt und der zyklische Anteil der Amplitude leicht reduziert wird. Dadurch wird die effektive Amplitude zwischen Grunddurchbiegung und zyklischem Anteil weiter reduziert. Hierbei bildet sich jedoch kein Sattelpunkt aus, sondern ein 2/rev Blattschlagbewegung.

Auch die integrale Querkraft in Auftriebsrichtung zeigt eine 2 /rev Schwingung jedoch mit deutlichem Unterschied in der Amplitude der ersten und zweiten Schwingung.



(a) Blattschlagbewegung

(b) Elastische Blatttorsion

Abbildung 5.25: Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$.

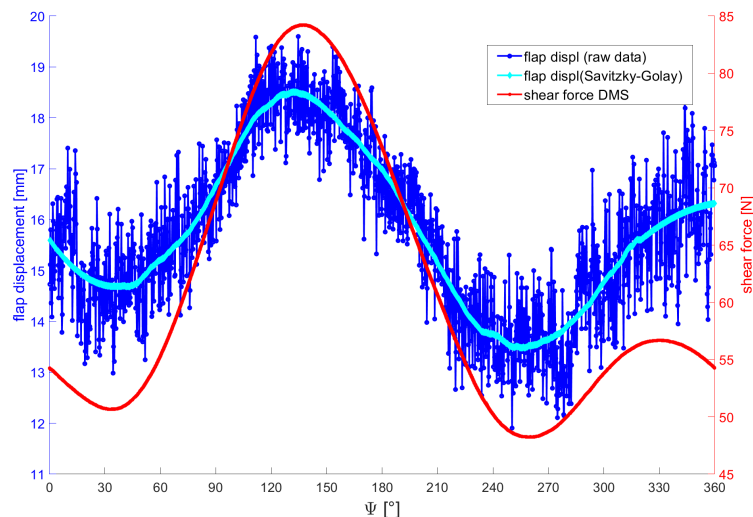


Abbildung 5.26: Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$

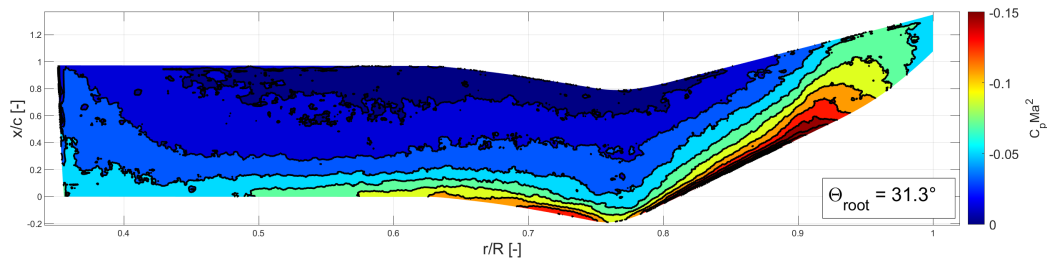


Abbildung 5.27: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$

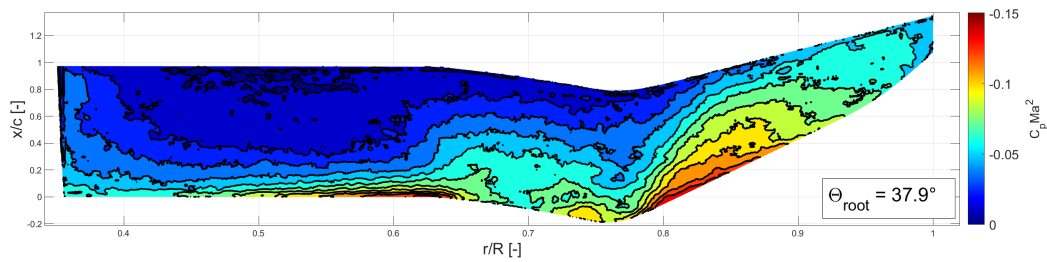


Abbildung 5.28: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$

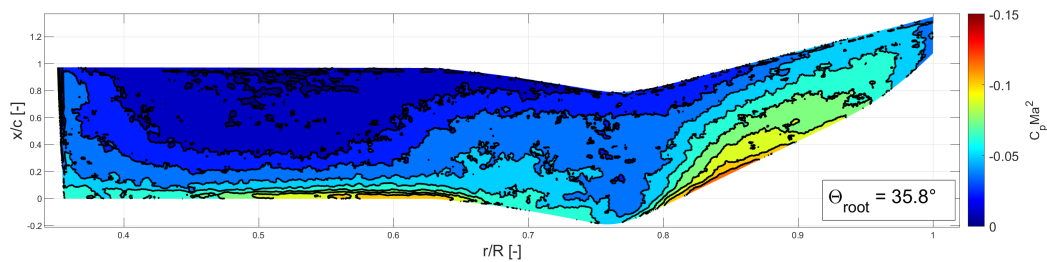


Abbildung 5.29: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$

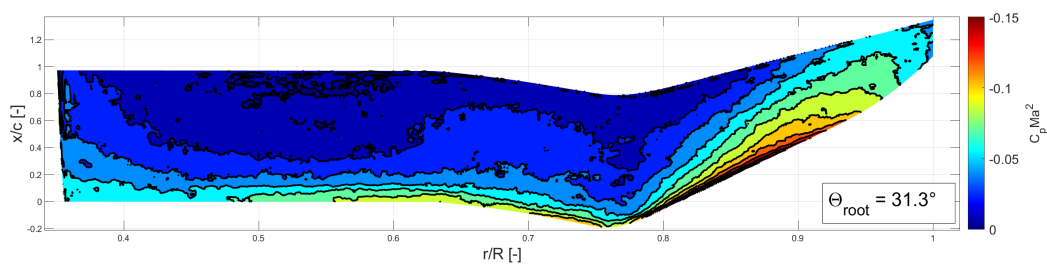


Abbildung 5.30: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$

In den Abbildungen 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36, und 5.37 sind die Ergebnisse für die kollektive Blattpolare $\Theta = 6^\circ - 38^\circ$ dargestellt. Abbildung 5.31 zeigt das Blattschlagen (a) sowie die elastische Torsion (b) der Rotorblattspitze über dem Einstellwinkel. Im Schlagverhalten lässt sich ein annähernd linearer Trend im Aufbiegen der Blattspitze über dem Einstellwinkel erkennen, welcher erst im hohen Einstellwinkelbereich aufgrund von großflächigem Strömungsabriss (siehe Abb.5.31 $\Theta = 30^\circ - 38^\circ$) kontinuierlich abflacht. Zudem zeigt der Vergleich von integraler Querkraft in Auftriebsrichtung (Abb. 5.32) und Blattschlagen (Abb. 5.31 (a)) gute Übereinstimmung. Betrachtet man die elastische Blatttorsion und das integrale Blattnickmoment lässt sich ab $\Theta = 24^\circ$ ein massives Absinken des Gradienten des Blattnickmomentes erkennen. Zudem zeigt sich zwischen $\Theta = 24^\circ - 38^\circ$ ein deutlicher Anstieg der Standartabweichung (Blattnickmoment). Erst ab $\Theta = 33^\circ$ steigt das integrale Blattnickmoment und die elastische Blatttorsion wieder an. Dies lässt sich auf die zeitlich versetzte Strömungsablösung zwischen rückwärts und vorwärts gepfeilten Teil des Rotorblattes zurückführen.

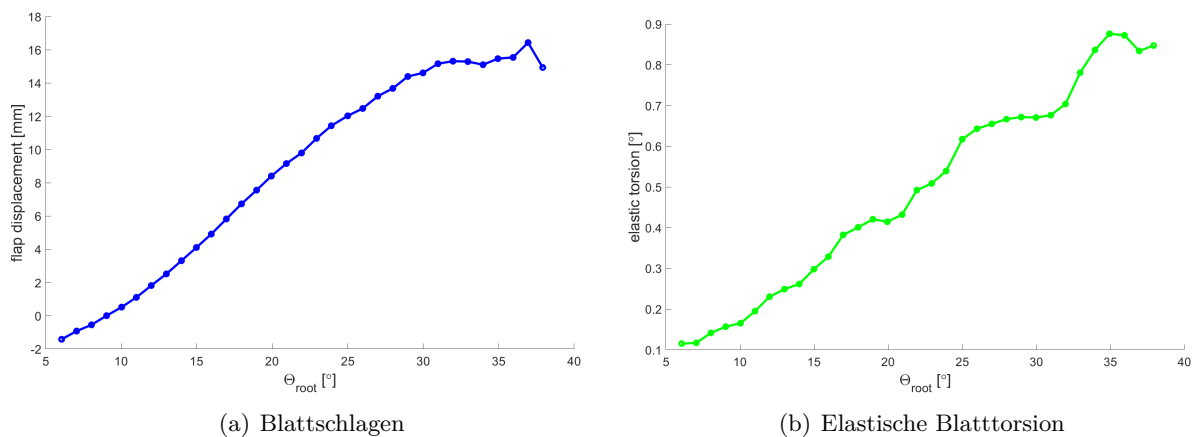


Abbildung 5.31: Elastische Blattverformung für $\Theta = 6^\circ - 38^\circ$.

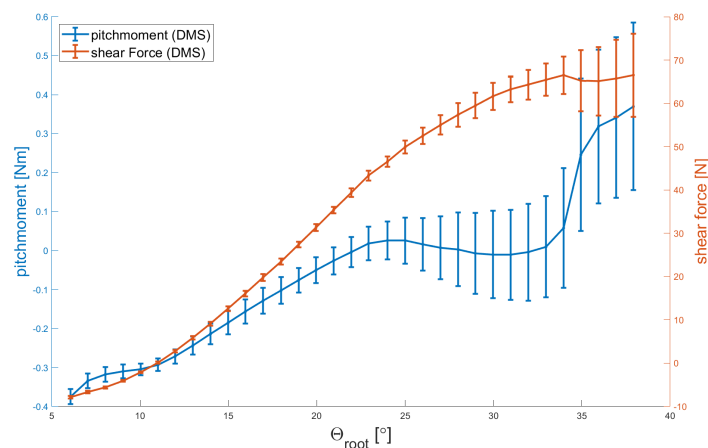


Abbildung 5.32: Nickmoment und Querkraft in Auftriebsrichtung über für $\Theta = 6^\circ - 38^\circ$

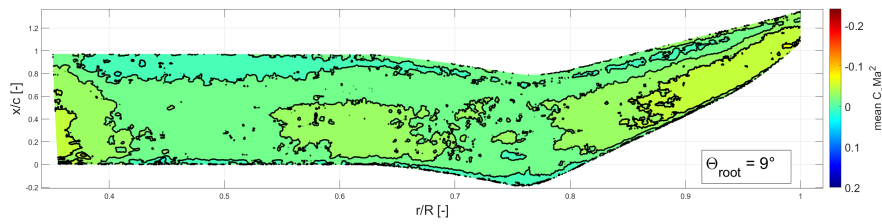


Abbildung 5.33: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 9^\circ$

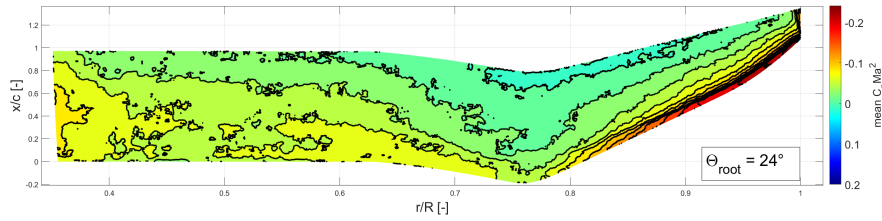


Abbildung 5.34: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 24^\circ$

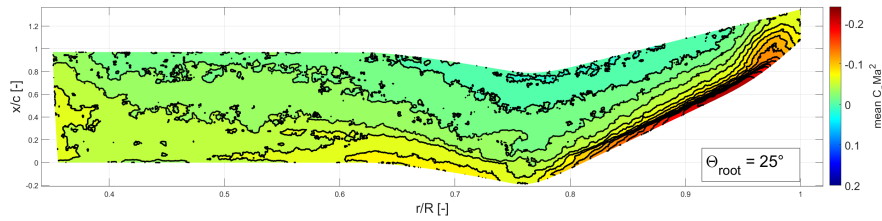


Abbildung 5.35: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 25^\circ$

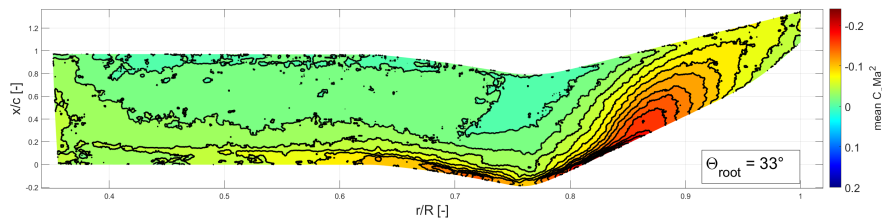


Abbildung 5.36: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 33^\circ$

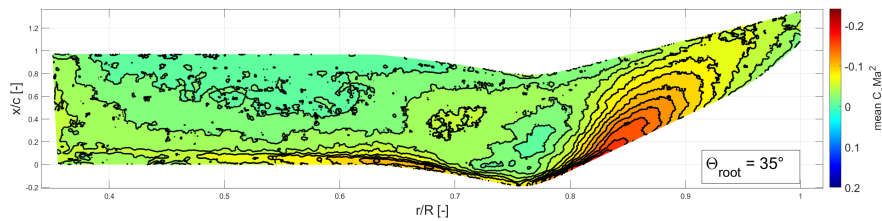


Abbildung 5.37: Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 35^\circ$

6 Zusammenfassung

Das Rotor Experiment zeigt umfassende Einblicke in die Blattschlagbewegung und elastische Blatttorsion unter Dynamic Stall Bedingungen. Hierbei erweisen sich die instationären Oberflächendruckverteilungen als überaus hilfreich um die Rotorblattbewegung, integralen Blattlasten und radiale Aerodynamik gekoppelt zu betrachten. Aus den Daten ergeben sich folgende Punkte:

- Aus den instationären Oberflächendrücken geht hervor, dass die Strömungsablösung an der Blattspitze einsetzt und sich über den gesamten rückwärts gepfeilten Teil des Rotorblattes, bis zum Knick zieht. Hierbei findet beim Einsetzen der Ablösung eine Interaktion mit dem Blattspitzenwirbel statt. Dieser zieht sich mit zunehmenden Einstellwinkel entlang der Vorderkante bis zu Knick des Rotorblattes und folgt dabei sichtbar der Rückwärtspfeilung des Rotorblattes.
- Bei den zyklischen Fällen $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$, $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$, $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$ und $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$ ist in der Blattschlagbewegung der Rotorblattspitze ein nicht lineares Verhalten zwischen Anregung (Einstellwinkelschwingung) und Blattschlagen zu erkennen. Hierbei bildet sich ein Sattelpunkt während des Abnickens aus, sodass die Schlagbewegung der Blattspitze der Anregung nicht mehr gleichförmig folgt (dies trifft für den zyklischen Fall $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$ zu). Dieser Effekt nimmt steigendem kollektiv Einstellwinkel zu und bildet für den Fall $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$ eine nahezu 2/rev Schlagbewegung aus. Zudem korrelieren die integrale Querkraft in Auftriebsrichtung und die Blattspitzenschlagbewegung azimuthal sehr gut.
- Bei der stationären Blattpolaren lässt sich vor allem im integralen Blattnickmoment ein signifikanter Abfall des Gradienten zwischen $\Theta = 23^\circ$ und $\Theta = 33^\circ$ erkennen. Dies lässt sich auf die zeitlich versetzte Strömungsablösung und Wirbelbildung zwischen vorwärts und rückwärts gepfeiltem Teil des Rotorblattes zurückführen. Für das Blattschlagen, lässt sich über einen weiten Einstellwinkelbereich ein nahezu linearer Trend im Aufbiegen der Rotorblattspitze erkennen. Ein Abflachen dieses Trends ist erst bei hohen Einstellwinkeln zu verzeichnen.

Literatur

- [1] MÜLLER, M. ; SCHWERMER, T. ; MAI, H. ; STIEG, C. : Development of an innovative double-swept rotor blade for the rotor test facility Göttingen. In: *DLRK - Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress* (2018). <https://elib.dlr.de/122702/>

- [2] 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 6* (2016), S. 663–673

Abbildungsverzeichnis

2.1	Planform, Verwindung, Pfeilung und Drucksensorposition [1].	2
2.2	DMS an der Blattwurzel für Querkraft, Nick- und Biegemoment	3
3.1	Rotor Testanlage Göttingen (RTG) [2].	4
4.1	Schematische Darstellung des experimentellen Versuchsaufbaus.	5
5.1	Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	8
5.2	Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	8
5.3	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	9
5.4	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	9
5.5	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	9
5.6	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 17^\circ \pm 8^\circ$	9
5.7	Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	10
5.8	Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	10
5.9	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	11
5.10	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	11
5.11	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	11
5.12	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 24^\circ \pm 6^\circ$	11
5.13	Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	12
5.14	Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	12
5.15	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	13
5.16	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	13
5.17	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	13
5.18	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 27^\circ \pm 6^\circ$	13
5.19	Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	14
5.20	Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	14
5.21	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	15
5.22	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	15
5.23	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	15
5.24	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 30^\circ \pm 6^\circ$	15
5.25	Elastische Blattverformung über Ψ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	16
5.26	Blattschlagen und Querkraft in Auftriebsrichtung über Ψ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	16
5.27	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 90^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	17
5.28	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 180^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	17
5.29	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 240^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	17
5.30	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) bei $\Psi = 285^\circ$ für $\Theta = 32^\circ \pm 6^\circ$	17
5.31	Elastische Blattverformung für $\Theta = 6^\circ - 38^\circ$	18
5.32	Nickmoment und Querkraft in Auftriebsrichtung über für $\Theta = 6^\circ - 38^\circ$	18
5.33	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 9^\circ$	19
5.34	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 24^\circ$	19

5.35	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 25^\circ$	19
5.36	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 33^\circ$	19
5.37	Oberflächendruckverteilung ($C_p Ma^2$) für $\Theta = 35^\circ$	19

Tabellenverzeichnis

1	Hauptmerkmale der Rotor Testanlage Göttingen	4
2	Messprogramm iPSP	6