



Schlussbericht ARCTIS

Periodische Regelung eines Rotors mit
formadaptivem Wölbungs-Mechanismus

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger: Hochschule München Fakultät für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Flugzeugtechnik Labor für Automatisierung und Dynamik 80335 München	Förderkennzeichen: 20E2108B Berichterstatter: Sabine Wisbacher Prof. Dr.-Ing. Daniel Ossmann
Vorhabenbezeichnung: ARCTIS Periodische Regelung eines Rotors mit formadaptivem Wölbungs-Mechanismus	
Laufzeit des Vorhabens: 07/2022 – 11/2025	

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt **ARCTIS** verfolgt das Ziel, die Leistungsfähigkeit von Hubschrauberrotoren durch die Entwicklung geeigneter Regelungsverfahren für Rotorblätter mit formadaptivem Wölbungsmechanismus zu verbessern. Hierzu werden sowohl nichtlineare Simulationen als auch linearisierte Modelle einer formadaptiven Rotorstruktur entwickelt und zur systematischen Auslegung von Regelungskonzepten eingesetzt. Ein zentraler Schwerpunkt liegt dabei auf der Reduktion von Blattlasten, Geräuschemissionen sowie des Leistungsbedarfs der Rotorstruktur. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zum förderpolitischen Ziel 3: „leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“ und unterstützt zugleich die Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Luftfahrt durch die Entwicklung von umweltverträglicheren Technologien.

1.2 Voraussetzungen

Die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Hubschraubern hinsichtlich Reichweite und Nutzlast erfordert zunehmend den Einsatz längerer und gleichzeitig leichter Rotorblätter. Die daraus resultierende erhöhte strukturelle Flexibilität führt jedoch zu komplexeren aeroelastischen Wechselwirkungen und macht Vibrationen zu einer zentralen Herausforderung bei der Auslegung moderner Rotorstrukturen.

Vor diesem Hintergrund untersucht das Projekt Methoden zur Minderung von Blattlasten bei gleichzeitiger Reduktion des Leistungsbedarfs von Hubschrauberrotoren durch die aktive Regelung der Wölbung formadaptiver Rotorblätter.

Für die Analyse dieser Ansätze werden zunächst nichtlineare Modelle der Rotorstruktur benötigt, da entsprechende Mechanismen bislang nicht in Full-Scale realisiert wurden. Für die Auslegung innovativer Regelungsstrukturen werden daraus im weiteren Verlauf reduzierte Modelle abgeleitet. Auf dieser Grundlage können geeignete Auslegungsstrategien für die Regelung des aktiven Wölbungsmechanismus entwickelt und untersucht werden, die eine gleichzeitige Reduktion von Blattlasten, Lärmemissionen und Leistungsbedarf ermöglichen.

Ein wesentliches Erfordernis besteht dabei darin, dass die Regelungsmaßnahmen keine negativen Auswirkungen auf zentrale Flugeigenschaften oder andere relevante Leistungsparameter haben.

Im Fokus der Hochschule München stehen im Rahmen des Projekts insbesondere die Ableitung linearer Modelle für die untersuchte neuartige, formadaptive Rotorstruktur sowie die Entwicklung und Bewertung geeigneter Regelungsstrategien. Diese zielen darauf ab, Blattlasten und Leistungsbedarf gezielt zu reduzieren, ohne die flugdynamischen Eigenschaften des Hubschraubers zu beeinträchtigen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20E2108 gefördert. An der Durchführung waren folgende Partner beteiligt:

- Technische Universität München (TUM)
- Hochschule München (HM)
- Technische Universität Dresden (TUD)

Die Technische Universität München übernahm die Rolle des Konsortialführers. Ein Kick-off-Treffen der Projektpartner fand im August 2022 an der Technischen Universität München statt. Die Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums wurde durch regelmäßige Online-Treffen koordiniert. Treffen mit dem Projektträger fanden in Präsenz in Dresden (November 2023) und an der Hochschule München (November 2024) statt, sowie Online im November 2025.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Auslegung von Hubschrauber-Rotorsystemen ist maßgeblich durch stark variierende und anspruchsvolle Betriebsbedingungen eingeschränkt. Insbesondere erfordern unterschiedliche Flugzustände wie Schwebeflug und Vorwärtsflug widersprüchliche Anforderungen an die Blattgeometrie. Während einer Rotorumdrehung treten zudem lokal stark unterschiedliche aerodynamische Bedingungen auf, sodass eine einheitliche Blattgeometrie stets einen Kompromiss darstellt und in keinem Betriebszustand optimal ist. Dies begrenzt den aerodynamischen Wirkungsgrad und führt zu erhöhtem Leistungsbedarf, höherem Treibstoffverbrauch und gesteigerten Lärmemissionen.

Zur Überwindung dieser Einschränkungen wurden verschiedene aktive Steuerungskonzepte untersucht, insbesondere im Kontext höherharmonischer Ansteuerungen. Dazu zählen unter anderem Full-Blade-Feathering-Systeme, Individual Blade Control (IBC) sowie aktive Hinterkantenklappen [1-6]. Experimentelle und numerische Studien, beispielsweise an UH-60A Black Hawk Helikopter- und MBB Bo 105 Helikopter-Rotoren, zeigen, dass durch geeignete periodische Ansteuerungen Leistungsreduktionen im Bereich von etwa 3–5 % möglich sind. Gleichzeitig können Schubverteilungen gezielt beeinflusst und Blattbelastungen angepasst werden. Auch aktive Verwindung (Twist) sowie Morphing-Ansätze mit kontinuierlicher Wölbung wurden untersucht und weisen vergleichbare Potenziale auf.

Ein zentrales Ergebnis dieser Arbeiten ist, dass glatte, kontinuierliche Wölbungsänderungen gegenüber diskreten Klappenlösungen aerodynamische Vorteile bieten, da sie zusätzliche Widerstandsverluste vermeiden. Entsprechende Studien, unter anderem im Rahmen europäischer Forschungsprojekte, zeigen Verbesserungen sowohl im Schwebeflug als auch im Vorwärtsflug [7-9]. Darüber hinaus konnten mit innovativen Aktuierungskonzepten wie Mehrfach-Taumelscheiben signifikante Reduktionen von Vibrationslasten erzielt werden.

Aus systemdynamischer Sicht stellt der Hubschrauberrotor ein System dar, das zyklischen Belastungen unterliegt. Dies eröffnet die Möglichkeit, das Problem als gezielte Unterdrückung dieser Störungen zu formulieren und mit Methoden der modernen Regelungstechnik zu adressieren. Insbesondere robuste und periodische Regelungsverfahren bieten hier ein hohes Potenzial.

Vor diesem Hintergrund zielt das Projekt ARCTIS auf die Entwicklung fortschrittlicher Regelmethode zur Reduktion der Leistungsaufnahme sowie störungsbedingter Einflüsse ab. Ziel ist es, bestehende Methoden weiterzuentwickeln und in praxisrelevante Anwendungen zu überführen, um langfristig durch Formadaption effizientere Rotorblätter zu ermöglichen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Außer der Zusammenarbeit im Konsortium fand keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen statt, die über den üblichen informellen Austausch unter Wissenschaftlern hinausging.

2. Eingehende Darstellung

Die Hochschule München war im Projekt im Hauptarbeitspaket 1 – Leistungsorientierte Rotorregelung sowie im Hauptarbeitspaket 3 – Geometrie-Optimierung tätig.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse, Verwertung sowie Evaluierung der erreichten SMART-Ziele sind auf die entsprechenden Arbeitspakete begrenzt.

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis

SMART-Ziele

(S) Spezifisch:

- Adäquate Modelle für die Auslegung innovativer Regelungsstrukturen wurden abgeleitet
- Blattlasten und Leistungsbedarf konnten erfolgreich mit Hilfe der entwickelten Regelungsstrukturen reduziert werden
- Ein Regler zur Stabilisierung des Morphing Aktuators konnte ausgelegt werden

(M) Messbar:

- Die abgeleiteten linearen Modelle konnten erfolgreich anhand der nicht-linearen Simulation verifiziert werden
- Die erreichte Lasten- und Leistungsreduktion wurde quantifiziert mit etablierten und validierten Berechnungsmethoden

(A) Attraktiv:

- Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine wichtige Erweiterung des Stands der Technik für die weiterführende Entwicklung von innovativen Rotorstrukturen.

(R) Realistisch:

- Die direkte Berücksichtigung des Morphing-Mechanismus in den für die Auslegung des Reglers verwendeten Modelle hat zu einer erfolgreichen Reduzierung der Blattlasten geführt.
- Die entwickelte Regelungsstruktur zur Leistungsoptimierung zeigt, dass durch den Einsatz des Morphing-Mechanismus eine signifikante Verringerung des Leistungsbedarfs des Rotors in den verwendeten Modellen erzielt werden kann.

(T) Terminiert:

- Die Ziele des Projektes wurden innerhalb des Zeitrahmens erreicht.

Modellbildung Rotor mit Morphing (AP 1.1)

Eine wesentliche Voraussetzung für die Auslegung moderner, modellbasierter Regelungsstrategien ist die Verfügbarkeit eines validen linearen Modells der zu regelnden Dynamik. Im Rahmen des ARCTIS-Projekts wird ein solches Modell aus einem von der TU Dresden entwickelten nichtlinearen Rotorsimulation abgeleitet.

Die nichtlineare Simulation wurde in ASWING erstellt und stellt gegenüber der von der TU München in Dymore entwickelten Simulation eine vereinfachte Beschreibung dar. Vergleichsuntersuchungen zeigen jedoch, dass beide Simulationen in den relevanten Ausgangsgrößen eine gute Übereinstimmung aufweisen. Für die Ableitung linearer Modelle im Kontext der Reglerauslegung ist die ASWING-Simulation besser geeignet. Sie bildet das transiente Systemverhalten sowie die daraus resultierenden dynamischen Effekte über eine größere Bandbreite an Eingangssignalen zuverlässig ab und stellt damit eine robuste Grundlage für die Ableitung von Modellen für die Reglerauslegung dar.

Für die Reglerauslegung müssen Modelle der relevanten Rotordynamik in Zustandsraumdarstellung (ZRD) abgeleitet werden. Die ZRD beschreibt dabei die Dynamik von Systemen durch Differentialgleichungen erster Ordnung. Im Rahmen des Projekts wurden Subraum Techniken zur Ableitung von Modellen dieser Art aus den nicht-linearen Simulationsdaten untersucht.

In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze zur Modellidentifikation, die sich sowohl in ihrer methodischen Herangehensweise als auch in ihren Anwendungsbereichen unterscheiden. Klassische, Parameteridentifikationsverfahren wie in [10, 11] werden insbesondere dann eingesetzt, wenn die zugrunde liegende Systemstruktur bereits weitgehend bekannt ist. Für komplexe Systeme wie den adaptiven Rotor im ARCTIS-Projekt, bei dem keine explizite Struktur der linearen dynamischen Zusammenhänge bekannt ist, kommen hingegen datengetriebene, sogenannte Black-Box-Ansätze zum Einsatz. Hierzu zählen unter anderem Verfahren wie die *Canonical Variate Analysis*, der *n4sid* Algorithmus

sowie den Multivariablen Output-Error State Space Algorithmus (MOESP) [12]. Im Rahmen dieses Projekts wurde der MOESP Algorithmus weiter untersucht, da er eine numerisch effiziente und robuste Methode zur Identifikation linearer Modelle auf Basis von sowohl Simulation als auch potentiellen Messdaten darstellt [13].

Der MOESP Algorithmus als Subraum-basiertes Verfahren liefert im Allgemeinen ein diskretes, linear zeitinvariantes Zustandsraummodell der Form

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k) + Du(k)\end{aligned}$$

wobei A , B , C und D die Systemmatrizen darstellen und die Vektoren $x(k)$, $u(k)$ und $y(k)$ die Zustände, Eingänge und Ausgänge des Systems zum diskreten Zeitpunkt k beschreiben. Ziel der Identifikation ist es, diese Systemmatrizen aus gegebenen Ein- und Ausgangsdaten zu bestimmen, ohne dass eine explizite Modellstruktur vorab festgelegt wird. Dabei stellt insbesondere die Trennung der systemeigenen Dynamik von den durch die Eingänge angeregten Anteilen eine zentrale Herausforderung dar.

Zur Lösung dieses Problems werden die Ein- und Ausgangsdaten so umstrukturiert, dass sogenannte Signalmräume entstehen, die über die Systemmatrizen miteinander verknüpft sind. Ausgangspunkt ist eine Umformulierung des Zustandsraummodells in eine Eingangs-Ausgangs-Darstellung, welche den Systemzustand zu einem beliebigen Zeitpunkt auf den Anfangszustand, die Systemmatrizen sowie die zeitliche Historie des Eingangssignals zurückführt. Durch die Bildung mehrerer Datenblöcke fester Länge (Subraum-Dimension) lassen sich daraus strukturierte Datenmatrizen aufstellen, die in einer sogenannten Datengleichung zusammengefasst werden. Dafür wird das ZRD zunächst in ein Eingangs-Ausgangsmodell

$$y(i) = C \left(A^i x(0) + \sum_{k=0}^{i-1} A^{i-k-1} B u(k) \right) + D u(i)$$

umgeformt, mit dem jede Instanz i der Systemantwort über die Systemdynamik und den Zeitschrieb des Eingangssignals zurück auf die initiale Ausgangslage des Systems gerechnet werden kann. Diese Eingangs-Ausgangsgleichung wird dann für mehrere Sequenzen aus dem simulierten Szenario aufgestellt. In der sich daraus ergebenden Darstellung kann der Einfluss des generierten Eingangssignals auf die Dynamik des Systems herausgerechnet werden, wodurch sich inhärentes und aufgeprägtes Systemverhalten unterscheiden lassen.

In Abbildung 1 ist das Prinzip grafisch dargestellt. Die simulierten Daten werden für die Subraumidentifikation in einzelne Datensequenzen unterteilt. Die Länge dieser Datensequenzen bestimmt die Dimension des Subraums in den die Daten projiziert werden. Je nach Ordnung des Systems ergeben sich in diesen Subräumen aus den Datensequenzen Geometrien niedrigerer Dimension. Die Anzahl der Dimensionen dieser Geometrien sowie die Ausdehnung in diesen Dimensionen ist repräsentativ für die Dynamik des Sys-

tems. Je nach Dimension des Subraums kann dabei klarer unterschieden werden zwischen den Dimensionen mit dominanter Ausdehnung und weniger dominanten Ausdehnungsrichtungen. Somit ergeben sich für die Optimierung der Identifikation zwei Optimierungsparameter. Zum einen die Anzahl der Dimensionen des Subraums, in den die Simulationsdaten projiziert werden, zum anderen die Anzahl der Dimensionen, die von der reduzierten Geometrie berücksichtigt werden.

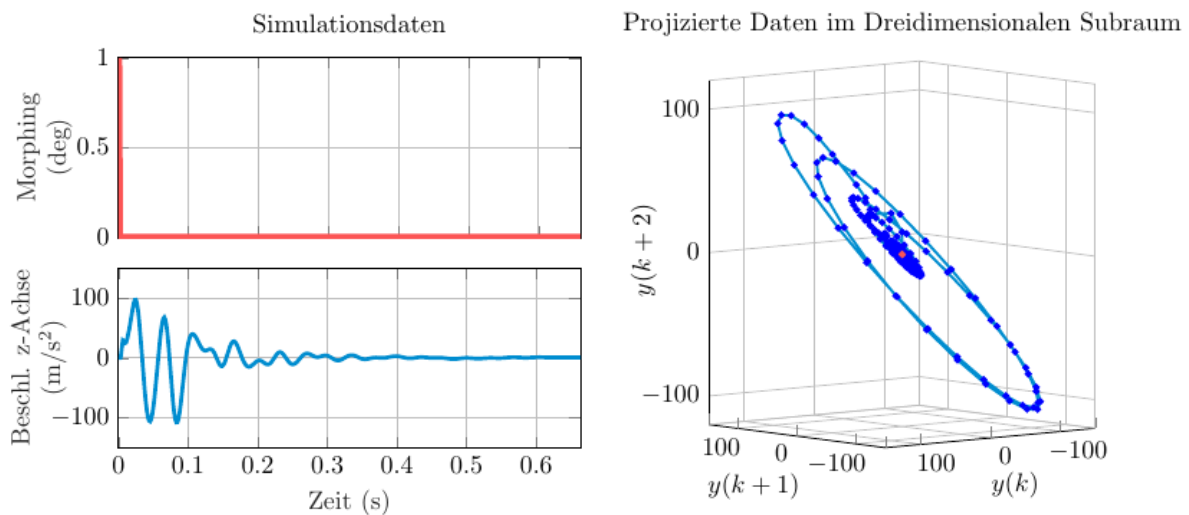


Abbildung 1: Prinzip der Subraumidentifikation

Für die finale Identifikation im Rahmen des ARCTIS Projekts wird der Verwölbungsmechanismus als Eingangssignal verwendet und die Kräfte und Momente an der Blattwurzel als Ausgangssignal ausgewertet. Um sicherzustellen, dass alle relevanten Dynamiken in diesen Signalen inkludiert sind wurden die Simulationsszenarien sorgfältig so ausgelegt, dass über die Form des Eingangssignals ein breites Frequenzspektrum abgebildet wird. Abbildung 2 zeigt Form und Frequenzspektrum des final gewählten Eingangssignals. Das gewählte Signal deckt einen Frequenzbereich von 1,5-6-mal der Rotorfrequenz (P) ab und stellt damit sicher, dass alle Dynamiken die für die Auslegung von Last und Lärmmindeungsreglern relevant sind adäquat angeregt werden.

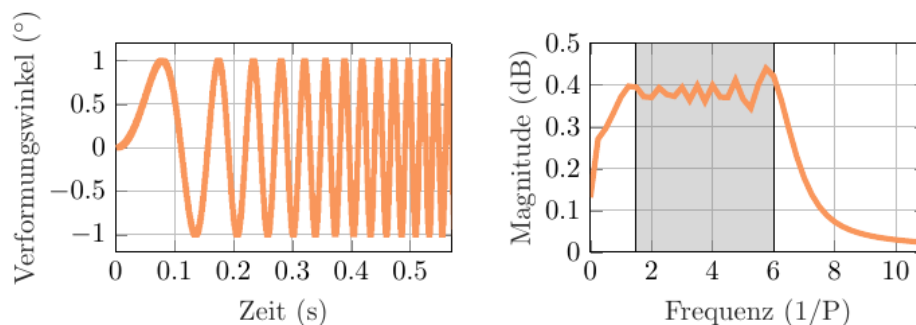


Abbildung 2: Form und Frequenzspektrum des für die die Identifizierung verwendeten Eingangssignals

Für den Identifizierungsprozess wurden die beiden Optimierungsparameter, Anzahl der Zustände und Subraumdimensionen untersucht um eine möglichst einfache aber dennoch akkurate lineare Darstellung der Rotordynamik zu erreichen. Zur quantitativen Bewertung der Modellgüte wird im Rahmen dieser Arbeit der sogenannte Fitness-Wert herangezogen. Dieser vergleicht die vom identifizierten Modell vorhergesagten Ausgangsgrößen mit den zugrundeliegenden Simulationsdaten und ist definiert als

$$f_y = 100 \cdot \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|^2}{\|y - \bar{y}\|^2} \right).$$

Der Fitness-Wert ist in Prozent angegeben und entspricht einem normierten Fehlermaß, bei dem die Abweichung zwischen Modellvorhersage \hat{y} und Referenzdaten y durch die Streuung der Daten um ihren Mittelwert \bar{y} normiert wird. Ein Fitness-Wert von 0 % bedeutet, dass das Modell die Daten nicht besser beschreibt als deren Mittelwert [14]. Negative Werte weisen darauf hin, dass die Modellabweichung größer ist als die natürliche Streuung der Daten, was beispielsweise auf einen konstanten Versatz oder eine unzureichende Abbildung der Systemdynamik zurückzuführen sein kann.

Zur Bewertung der Gesamtgüte wird der mittlere Fitness-Wert über aller sechs Ausgangsgrößen des Rotormodells gebildet. Dieser dient als Maß dafür, wie gut die identifizierten Modelle die zugrundeliegende Dynamik in Abhängigkeit von Subraumdimension und Modellordnung wiedergeben. Für jede gewählte Modellordnung wurde die Identifikation mit 30 unterschiedlichen Subraumdimensionen durchgeführt, wobei die Subraumdimension stets größer als die Anzahl der Zustände gewählt werden muss.

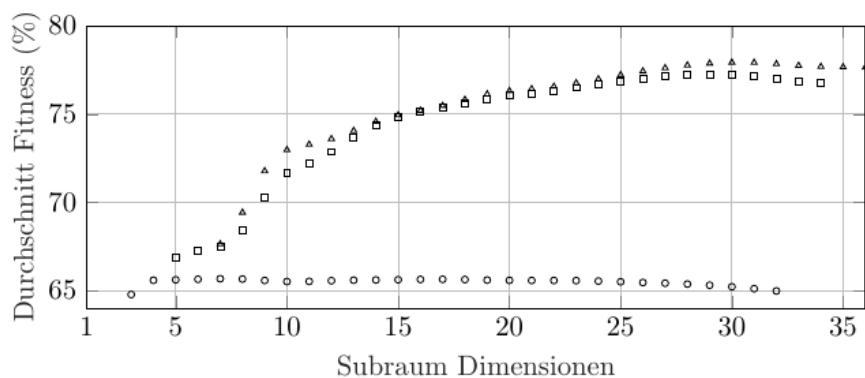


Abbildung 3: Durchschnittlicher Fitness-Wert über Subraumdimensionen für identifizierte Modelle mit 2(○), 4(□), und 6(△) Zuständen

Die Auswertung zeigt, dass das qualitativ beste Modell eine Zustandsdimension von sechs aufweist und bei einer Subraumdimension von 30 identifiziert wird. In diesem Fall ergibt sich ein mittlerer Fitness-Wert von etwa 77,6 %. Im Hinblick auf die spätere Anwendung in modellbasierten Regelungsverfahren ist jedoch eine möglichst geringe Modellordnung anzustreben. Es zeigt sich, dass auch mit einem Modell vierter Ordnung bei geeigneter Wahl der Subraumdimensionen vergleichbare Fitness-Werte erreicht werden können,

wodurch ein günstiger Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Komplexität erzielt wird.

Das mit diesen Parametern identifizierte wurde anhand unabhängiger Simulationsläufe validiert, um sicherzustellen, dass die modellierte Dynamik das Verhalten der nichtlinearen Referenzsimulation über verschiedenen Szenarien hinweg adäquat abbildet. Hierzu werden zwei Anregungssignale verwendet: ein Chirp-Signal sowie ein Impulssignal, die beide in der oberen Darstellung von Abbildung 4 gezeigt sind. Das verwendete Chirp-Signal unterscheidet sich vom Identifikationssignal sowohl hinsichtlich Amplitude als auch Frequenzbereich. Sein Frequenzspektrum, dargestellt im rechten Diagramm in Abbildung 4, liegt überwiegend in einem niedrigeren Frequenzbereich als das des Identifikationssignals. Das Spektrum des Impulssignals unterscheidet sich grundlegend von dem des Chirp-Signals, da es über einen breiten Frequenzbereich annähernd konstant bleibt. Zudem weist es insgesamt geringere Amplituden auf. Dadurch stellt es eine anspruchsvolle Anregung dar, mit der insbesondere die Abbildung schneller und schwach ausgeprägter Dynamiken überprüft werden kann.

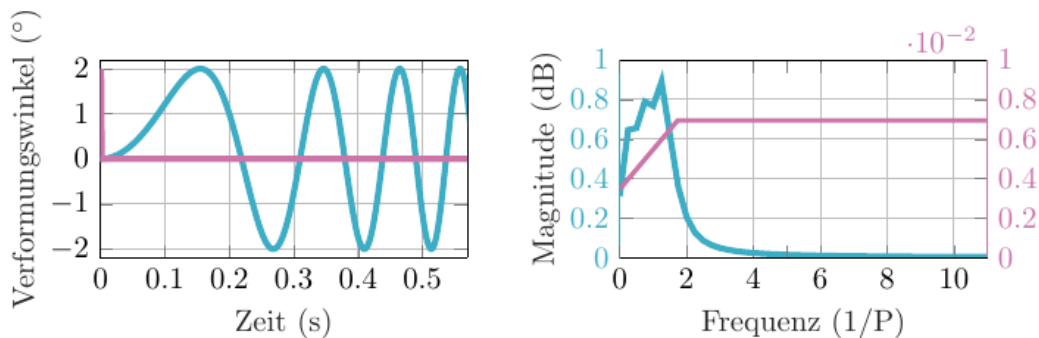


Abbildung 4: Form und Frequenzspektrum der Eingangssignale für Verifikationsszenarien

Die Modellantworten auf die beiden Anregungssignale sind gemeinsam mit den Ergebnissen der nichtlinearen Simulation in xxx dargestellt. Für beide Eingangsszenarien zeigt sich, dass die dominanten Reaktionen in den Kanälen F_z und M_x auftreten. Für das Chirp-Signal erreicht das lineare Modell in diesen beiden Größen Fitness-Werte von etwa 86 % und liegt damit auf einem ähnlichen Niveau wie im Identifikationsfall. Für das Impulssignal fallen die Fitness-Werte mit etwa 71 % bis 74 % etwas geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Impulssignal auch höhere Frequenzen anregt, die aufgrund des gewählten Anregungsspektrums im Identifikationsprozess nicht vollständig im Modell erfasst werden.

In den Kanälen F_y und M_y können für das Chirp-Signal Fitness-Werte von etwa 81 % bzw. 82 % erreicht werden, womit die Modellgüte im Vergleich zur Identifikation weitgehend erhalten bleibt. Für das Impulssignal sinken die Werte jedoch auf etwa 38 % für F_y und 67 % für M_y . Dies deutet darauf hin, dass die Dynamik in diesen Kanälen im niedrigen Frequenzbereich gut erfasst wird, während Beiträge höherer Frequenzen vom Modell nur unzureichend abgebildet werden. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in den Kanälen F_x und M_z : Für das Chirp-Signal werden Fitness-Werte zwischen etwa 66 % und 78 % erzielt, wäh-

rend sie für das Impulssignal – bedingt durch geringe Signalamplituden und Modellabweichungen bei hohen Frequenzen – deutlich abfallen. Für F_x ergibt sich ein Wert von rund 28 %, während der Fitness-Wert für M_z sogar negativ wird.

Die exakten Fitness-Werte aller sechs Ausgangsgrößen für beide Validierungsszenarien sowie für den Identifikationsdatensatz sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Insgesamt zeigt sich, dass das Modell die dominanten Dynamiken in den Kanälen F_z und M_x sehr gut erfasst. Einschränkungen bestehen insbesondere bei den durch das Morphing weniger stark angeregten Dynamiken die sich in der Rotorebene abspielen (F_x, M_z) sowie bei höheren Frequenzen in einzelnen Kanälen. Da diese Frequenzanteile jedoch außerhalb des relevanten Arbeitsbereichs der betrachteten Regelungsansätze liegen, ist die Modellgüte für den vorgesehenen Einsatzzweck als ausreichend zu bewerten. Das identifizierte Modell stellt somit eine geeignete Grundlage für die Entwicklung modellbasierter Regelungsverfahren dar.

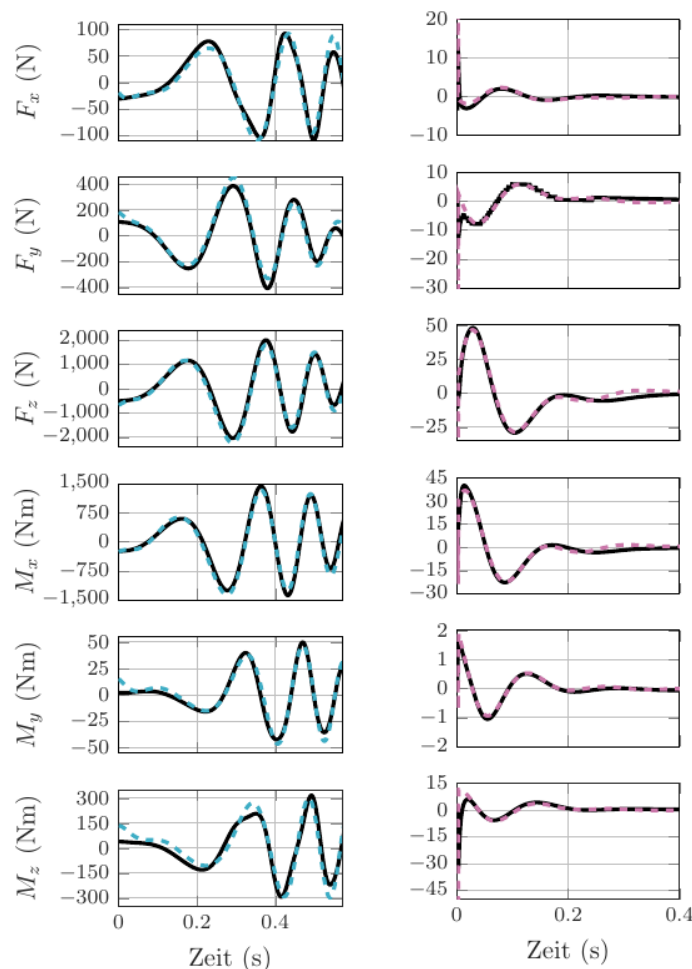


Abbildung 5: Vergleich des Systemverhaltens der linearen Modellierung (---) mit dem Verhalten der nicht-linearen Simulation (schwarz), für ein Chirp-Eingangssignal (links) und ein Impulseingangssignal (rechts)

Tabelle 1: Identifikation und Verifikation Fitness-Werte in Prozent

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Identifiziert	81,1	76,4	88,2	89,6	75,9	52,3
Chirp Verifikation	78,5	80,8	85,4	86,5	81,7	66,3
Impuls Verifikation	27,9	38,4	71,3	73,6	67,7	< 0

Extremwertregelung (AP 1.2)

In diesem Arbeitspaket wurde der zusätzliche Steuereingang des Verwölbungsmechanismus verwendet, um einen möglichst leistungsoptimierten Rotorbetrieb sicherzustellen. Dafür wurde ein Extremwertregler in Kombination mit einem Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) ausgelegt.

Für die Regelungsstruktur zur Leistungsoptimierung des adaptiven Bo105 Rotors wird der Zusammenhang von Auftrieb und Widerstand mit dem Anstellwinkel und Krümmung des Rotorblattes ausgenutzt. Das heißt als Stellwertvorgaben werden Blattanstellwinkel α und Verformungswinkel δ eingesetzt. Diese wiederum wirken sich über folgenden aerodynamischen Zusammenhang auf Leistung und Betriebspunkt des Rotors aus:

$$A = \bar{q} S_{ref} c_{A\alpha}(\delta) \alpha \quad W = \bar{q} S_{ref} c_{W\alpha}(\delta) \alpha$$

Die Anforderung an die Regelungsstruktur ist dabei, den Widerstand W zu minimieren und um den Flugzustand des Helikopters nicht zu beeinflussen, den vom Rotor erzeugten Gesamtauftrieb A konstant zu halten. Als Auslegungsmodell können hier Ersatzweisse für Auftrieb und Widerstand die in Abbildung 6 dargestellten Auftriebs- und Widerstandsbeiwertskurven genutzt werden. Diese sind jeweils proportional zu den messbaren bzw. schätzbaren Größen Auftrieb und Widerstand. Der Auftrieb lässt sich dabei über den Flugzustand schätzen während der Widerstand über den Leistungsbedarf des Rotors gemessen werden kann.

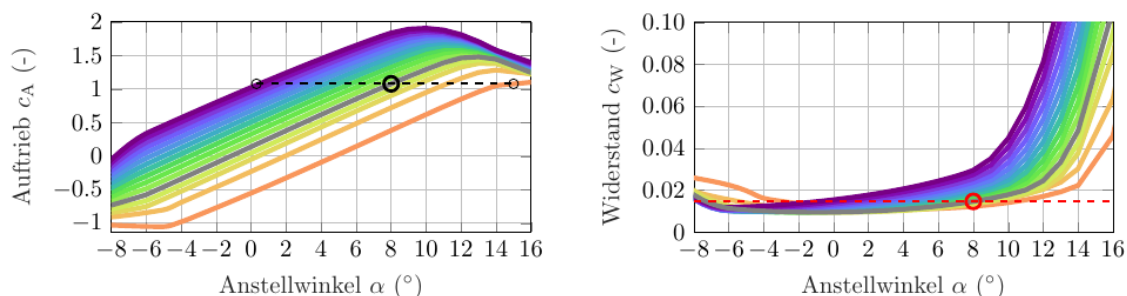


Abbildung 6: Auftriebs- und Widerstandsbeiwertskurven für verschiedene Verformungswinkel

Anhand der in Abbildung 6 dargestellten Kurven kann das Regelungsprinzip beispielhaft für den Schwebeflug nachvollzogen werden. Für den Schwebeflug ist ein Auftriebsbeiwert von $c_A = 1,078$ erforderlich, was an dem unverformten Rotor einen Blattanstellwinkel von $\alpha = 8^\circ$ entspricht [15]. Für diesen Trimpunkt ergibt sich ein Widerstandsbeiwert von

$c_w = 1,47 \cdot 10^{-2}$. Der entsprechende Betriebspunkt am unverformten Rotorblatt ist in Abbildung 6 jeweils mit einem Kreis gekennzeichnet. Da der Auftrieb konstant gehalten werden muss um einen stationären Betrieb gewährleisten zu können, muss der optimierte Betriebspunkt entlang einer Linie konstanten Auftriebsbeiwertes liegen. Für die Spanne von minimalem zu maximalen Verformungswinkel ergibt sich dabei ein möglicher Anstellwinkelbereich von etwa $0,3 - 15^\circ$. Diese Spanne bietet dem Regler die Möglichkeit über eine Verringerung des Anstellwinkels und entsprechende Anpassung des Verformungswinkels einen Betriebspunkt einzustellen, der eine geringeren Widerstandsbeiwert bei gleichem Auftriebsbeiwert erfordert. Anhand der Auftriebs- und Widerstandsbeiwertskurven ist zu erkennen, dass auch eine Erhöhung des Anstellwinkels bei entsprechender Anpassung des Verformungswinkels zu einer Reduktion des Widerstandsbeiwerts bei konstantem Auftriebsbeiwert führen kann, das Potential zur Verringerung des Widerstandes ist jedoch deutlich größer bei einer Verringerung des Blattanstellwinkels.

In der entwickelten Regelungsstruktur wird der PI-Regler eingesetzt um den Auftrieb und damit den Betriebspunkt über die Anpassung des Blattanstellwinkels konstant zu halten. Der Extremwertregler beeinflusst simultan den Verformungswinkel, um den Leistungsbedarf in dem entsprechenden Betriebspunkt zu minimieren. Die beiden Regelungsstränge sind damit klar getrennt und beeinflussen sich nicht gegenseitig. Während der PI-Regler Abweichungen vom aktuellen Referenzzustand verhindert, sorgt der Extremwertregler dafür, dass ein möglichst energieoptimaler Betriebspunkt eingestellt wird. Eine ähnliche Trennung der Regelungsaufgaben ist in [16] erfolgreich eingesetzt worden. Die Struktur des Regelungssystem kann in Abbildung 7 nachvollzogen werden.

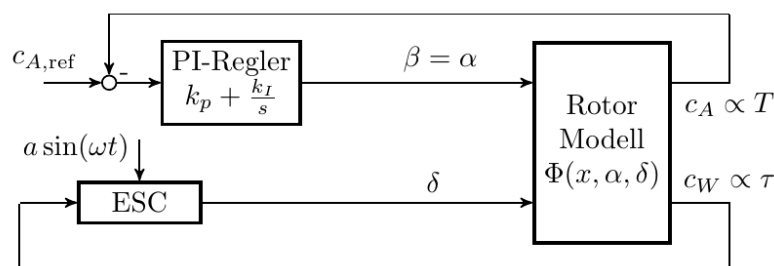


Abbildung 7: Regelungsstruktur zur Leistungsoptimierung

Eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung einer optimalen Regelungsstruktur bestand in der Einstellung der Regelungsparameter des Extremwertreglers. Die Einstellung dieser Parameter gestaltet sich in der Praxis generell als anspruchsvoll, da sie sich gegenseitig beeinflussen und eine manuelle Abstimmung häufig zu suboptimalen Ergebnissen führt. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein systemischer Ansatz entwickelt bei dem die entsprechenden Parameter über eine Optimierung mathematisch bestimmt werden können. Zu den einstellbaren Parametern zählen dabei die Adaptionsverstärkung k , die Amplitude a sowie die Frequenz ω des Modulationssignals innerhalb des Extremwertreglers. Darüber hinaus können die Eckfrequenzen der Hochpass- und Tiefpassfilter des Reglers ω_H und ω_L eingestellt werden. Während die gewählte Amplitude a auf Grund von physikalischen Überlegungen auf einen Wert von $0,1^\circ$ festgelegt wird, werden

die übrigen freien Parameter in Form eines Parametervektors q zusammengefasst und im Rahmen der Optimierung bestimmt.

Für die Eckfrequenzen werden dabei Schranken von $0,1(2\pi)^{-1}$ Hz bis 0,6 Hz gewählt. Die Adaptionsverstärkung wird auf den Bereich von 5 bis 15 begrenzt. Als Optimierungskriterium dient der Widerstandsbeiwert am Ende der Simulation, ergänzt durch die Nebenbedingung, dass sich das System zu diesem Zeitpunkt im stationären Zustand befindet. Die Optimierung wird mit Standardverfahren durchgeführt und benötigt etwa 100 s Rechenzeit. Die optimierten Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Insgesamt ergibt sich eine Reduktion des Energiebedarfs von 4,8 %, was einer Verbesserung von 1,3 % gegenüber der initialen Parametrierung entspricht. Dabei zeigt sich, dass insbesondere die Filterparameter angepasst werden, während die initial gewählten Werte für Anregungsfrequenz und Adaptionsverstärkung bereits nahe am Optimum liegen.

Tabelle 2: Initiale und Optimierte Parameter des Extremwertreglers

	ω_L (Hz)	$\omega_{\mathcal{H}}$ (Hz)	ω (Hz)	k (-)
Initialer Wert	0,16	0,16	0,90	10
Optimum	0,09	0,07	0,90	9,95
Schranken	[0,016 0,6]	[0,016 0,6]	[0,6 1,25]	[5 15]

Aktive Störunterdrückung (AP 1.3)

Für die aktive Störunterdrückung wurde ein \mathcal{H}_∞ -Regelungskonzept basierend auf dem in AP1 abgeleiteten linearen Rotormodell entworfen. Ziel dieses Reglers ist die aktive Reduktion der Rotorlasten, die infolge externer Störungen, wie beispielsweise Böen, auftreten. Der \mathcal{H}_∞ -Regler ist dabei die Lösung eines Optimierungsproblems bei der die Energieübertragung von äußeren Störungen auf das System minimiert wird. Die Synthese eines \mathcal{H}_∞ -Reglers kann durch die Lösung von zwei Riccati-Differenzialgleichungen erfolgen, welche durch eine algebraische *Spektralradius*-Bedingung gekoppelt sind [16]. Da die Ziele der Lärm- und Lastenreduktion durch eine gemeinsame Regelungsstrategie erreicht werden können, wurde die Auslegung der Regelungsstrategie in enger Zusammenarbeit mit der TUD durchgeführt. Einzelheiten zur Entwicklung der Reglerstruktur sind im Abschlussbericht der TUD dokumentiert [19].

Der Aufbau des aktiven Störunterdrückungsreglers kann in Abbildung 8 nachvollzogen werden. In dem dargestellten Blockdiagramm ist G das Rotormodell und K der \mathcal{H}_∞ -Regler. Als Systemausgang y werden die Kräfte an der Blattwurzel $[F_x, F_y, F_z]$ betrachtet. Diese werden mit einem Referenzwert r verglichen, der den jeweiligen Kräften im Trimmzustand ohne Störeinfluss entspricht. Die Abweichung zwischen der Referenz als Sollwert und dem Systemausgang als Istwert wird als Abweichung e bezeichnet. Basierend auf dieser Abweichung wird von dem Regler ein Stellkommando u in Form einer Blattverwölbung vorgegeben. Der Einfluss von Störungen d auf das System wird in diesem Schema als Eingangsstörung betrachtet und daher auf das Verwölbungskommando aufgerechnet. Diese

Betrachtung erschließt sich aus der Tatsache, dass sowohl eine Verwölbung des Rotorblatts als auch das Auftreten einer Bö effektiv eine Änderung des Anstellwinkels am Rotorblatt erzeugen.

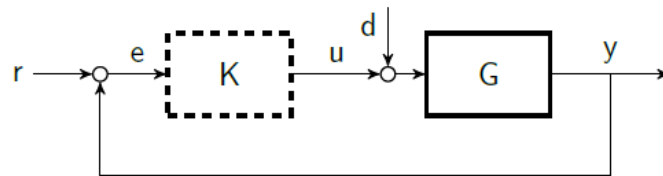


Abbildung 8: Regelungsstruktur der aktiven Störunterdrückung

Für eine Bö, die eine Änderung der Anströmrichtung um ein Grad über einen Zeitraum von fünf Sekunden bewirkt, sind die an der Blattwurzel anfallenden Lasten im unregulierten Fall in Abbildung 9 dargestellt. Die im rechten Teil der Abbildung gezeigten Kraftverläufe verdeutlichen, dass diese Störung erhebliche Wechsellasten in der Rotorstruktur erzeugt. Die dargestellten Kräfte sind jeweils relativ zum bestehenden Trimpunkt aufgetragen, sodass der Nullpunkt in den Diagrammen den Kräften im ungestörten Trimbetrieb entspricht. Um dieses Verhalten ein möglichst effizient und robust zu optimieren, wird das Auslegungsverfahren für den H_∞ -Regler gezielt so angepasst, dass eine explizite Dämpfung der auftretenden Blattmoden erfolgt [20]. Der Fokus liegt dabei auf der Dämpfung der Schwenkmode, also der Bewegung in x-Richtung des Rotorblattes, da diese eine geringe Eigendämpfung besitzt [21].

Um zudem sicherzustellen, dass Änderungen im Auftrieb minimal bleiben, wird für die Übertragung von Störungen und Änderungen am Rotorblatt auf eine Abweichung in F_z ein Integrales Verhalten erfordert. Dieses Verhalten wird in der Auslegung über entsprechende Gewichte aufgeprägt.

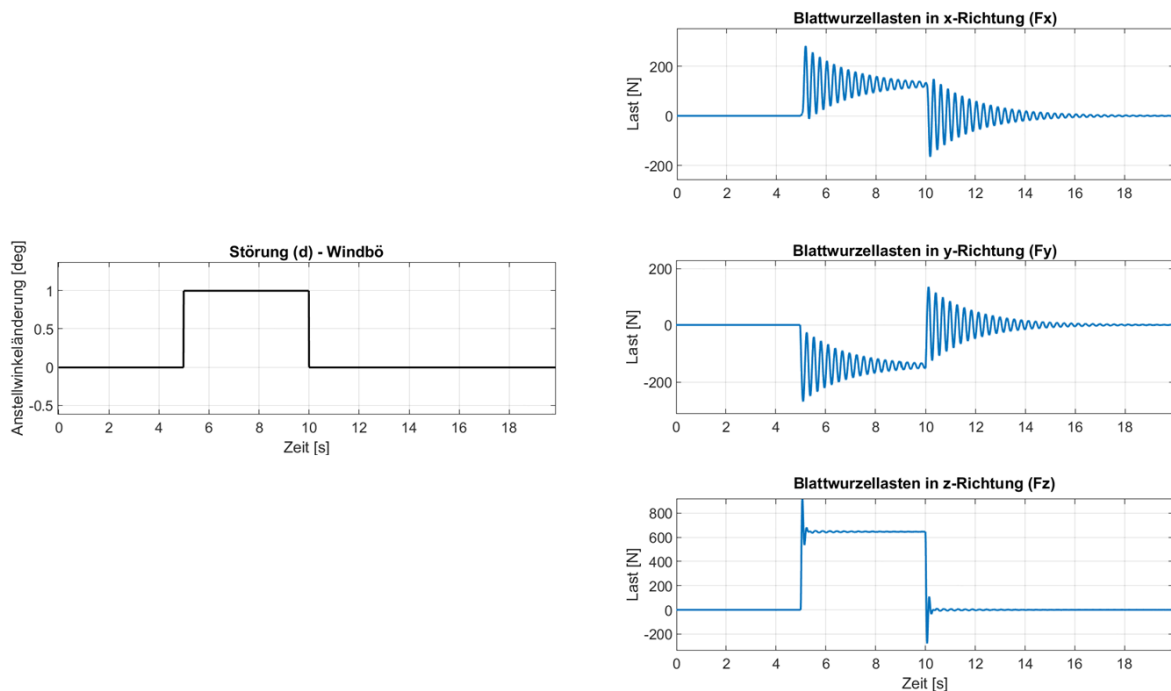


Abbildung 9: Blattlasten in Reaktion auf eine Bö im unregelten Fall

Beurteilte Performanceverbesserung (AP 1.4)

Für die Beurteilung der Performanceverbesserung wurden die in AP 2.2 und 2.3 entwickelten Reglerstrukturen anhand geeigneter Modelle verifiziert. Dabei wurden sowohl Leistungseinsparungen als auch die Effizienz der Störunterdrückung untersucht.

Leistungseinsparungen

Die aus dem in AP2.2 hervorgehende Reglerstruktur wird anhand der aus den Simulationsdaten der nicht-linearen Simulation der TU München abgeleiteten Auftriebs- und Widerstandsbeiwertskurven verifiziert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ergibt sich aus dem direkten Zusammenhang zwischen den verwendeten Kurven zu Auftrieb und Leistungsbedarf in der vollständigen Simulation, ermöglicht durch die Reduktion auf die relevanten Zusammenhänge aber eine deutlich schnellere und effizientere Überprüfung der Ergebnisse.

Auf der linken Seite in Abbildung 10 zeigt sich, dass mit dem implementierten Regelungskonzept innerhalb kurzer Zeit nach dem Optimierungsvorgang der Auftrieb konstant im Trimmwert gehalten wird. Dabei zeigt das rechte Diagramm eine deutliche Senkung des Widerstands von 4,8 %. Der Trimpunkt vor der Optimierung ist zum Vergleich in den Diagrammen in Grün dargestellt

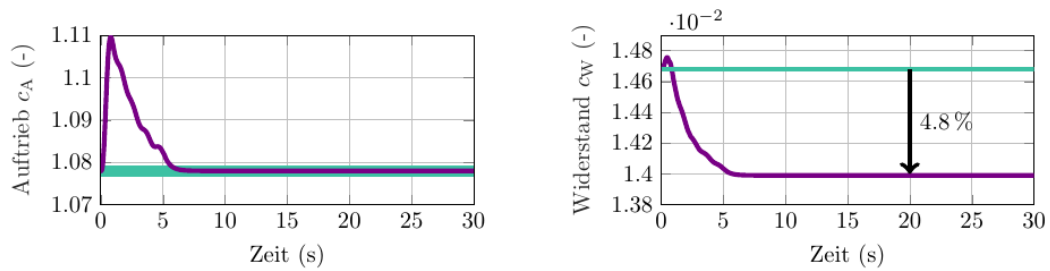


Abbildung 10: Rotor Betriebspunkt im geregelten Betrieb

Um ein vollständiges Bild der Funktionsweise des Regelungskonzepts zu erlangen müssen neben den Systemausgängen jedoch auch die dafür benötigten Eingangswerte analysiert werden. Abbildung 11 zeigt, dass für den optimierten Betriebspunkt der Blattstellwinkel von acht auf fünf Grad reduziert wird. Der Verformungswinkel wird simultan von Null auf fünf Grad erhöht. Beide Ausschläge sind in ihrer Amplitude und Reaktionsgeschwindigkeit realistisch.

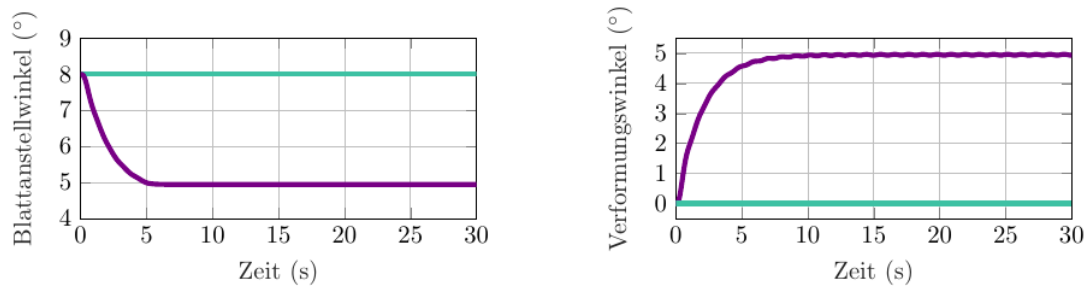


Abbildung 11: Rotoreingänge im geregelten Betrieb

Störunterdrückung

Die Wirksamkeit der Störunterdrückung wurde in der nichtlinearen Rotorsimulation der TUD untersucht. Im Vergleich zu dem in Abbildung 9 dargestellten linearen Modell zeigt die nichtlineare ASWING-Simulation ein insgesamt stärker gedämpftes Systemverhalten. Die resultierenden Kräfte und Momente infolge einer Änderung des Anströmwinkels um 10° sind in Abbildung 12 dargestellt; die unregulierte Reaktion ist dabei in Orange gezeigt.

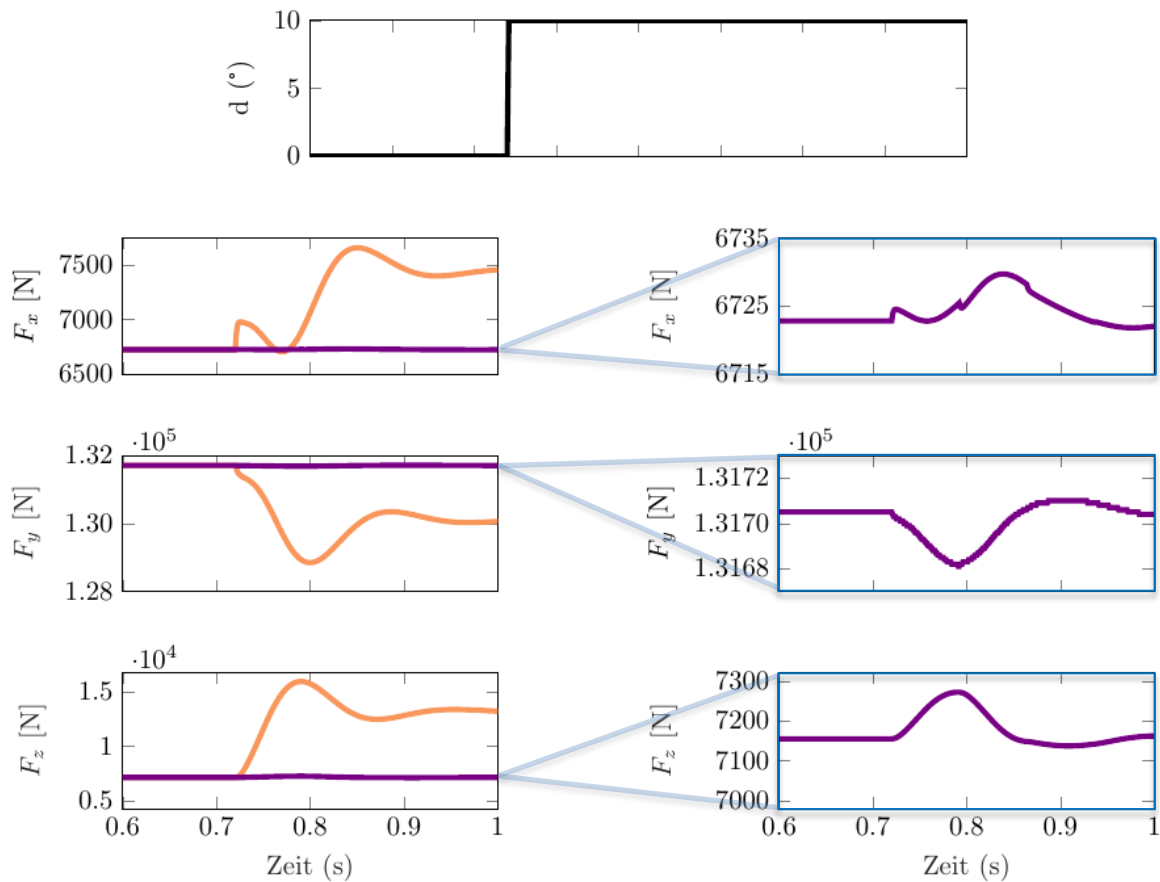


Abbildung 12: Blattwurzellasten in Reaktion auf eine Änderung im Anströmungswinkel im geregelten (violett) sowie im unregulierten (orange) Fall

Klar erkennbar in Abbildung 12 ist die deutliche Abweichung vom Referenzwert die im unregulierten (orange) Fall durch die Störung entstehen. Im Gegensatz dazu sind die Abweichungen im geregelten (violett) Fall deutlich geringer und transient. Die Abweichungen sind im Vergleich zum unregulierten Fall so gering, dass sie im rechten Teil der Abbildung noch einmal einzeln im vergrößerten Achsenabschnitt gezeigt werden

Damit wird gezeigt, dass die auf Basis der aus der Simulation abgeleiteten linearen Modelle entworfene Reglerstruktur erfolgreich zur Störunterdrückung eingesetzt werden kann und ihre Wirksamkeit auch im nichtlinearen Simulationsmodell bestätigt wird.

Stabilisierung Morphing-Aktuator (AP 3.2)

In diesem Arbeitspaket wurde der innere Regelkreis zur Positionsregelung des Verwölbungsmechanismus für den Einsatz in der CFD/FEM-Simulationsumgebung der TU München entwickelt. Eine präzise Umsetzung der vorgegebenen Positions- und Momentenanforderungen ist erforderlich, um in den gekoppelten Simulationen eine verlässliche Bestimmung der Rotorlasten und des Leistungsbedarfs zu gewährleisten. Damit stellt dieser

Arbeitsschritt eine wesentliche Grundlage für die bautechnische Auslegung und Optimierung der Rotorgeometrie dar.

Für die Positionsregelung der Hinterkantenklappe wurde ein PI-Regler entwickelt. Dieser basiert auf der Regelabweichung zwischen Soll- und Ist-Position und generiert daraus die erforderliche Stellgröße zur Ansteuerung des Verwölbungsmechanismus. Der Integralanteil gewährleistet die stationäre Genauigkeit, während der Proportionalanteil das dynamische Verhalten des Systems bestimmt und insbesondere die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst.

Die Parametrierung der Reglerverstärkungen K_p und K_i erfolgt unter Berücksichtigung der Rotationsfrequenz des Rotors sowie der geforderten Reaktionszeit. Ausgehend von initialen Schätzwerten werden die Parameter im Rahmen der Simulation iterativ angepasst. Ziel ist eine möglichst schnelle Nachführung bei gleichzeitig stabilem Verhalten ohne ausgeprägte Schwingungen. Zur Unterstützung der Parametrierung können sowohl klassische Verfahren, wie beispielsweise Ziegler-Nichols, als auch optimierungsbasierte Ansätze herangezogen werden.

Der Regler wurde in C++ implementiert und in die bestehende Simulationsumgebung integriert, wodurch eine effiziente Kopplung mit den CFD/FEM-Berechnungen sowie eine flexible Anpassung der Parameter ermöglicht wird.

Nach der Implementierung wurde der PI-Regler in die bestehende Simulationsumgebung integriert und im weiteren Verlauf kontinuierlich in den durchgeführten Simulationsrechnungen mitgeführt. Dabei zeigte sich, dass das Regelungssystem in den betrachteten Szenarien ein stabiles Verhalten aufweist und die Simulationen weiterhin robust durchgeführt werden konnten.

Insbesondere ergaben sich keine Hinweise auf instabile Wechselwirkungen zwischen Hinterkantenklappe und Strömung, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Regler die relevanten Dynamiken in ausreichendem Maße stabilisiert.

Der entsprechende C++ Code ist im Folgenden aufgeführt:

```
class PIController {
private:
    double kp;           // Proportional gain
    double ki;           // Integral gain
    double integral;     // Integral term accumulation
    double setpoint;     // Desired value (target)
    double lastError;   // Last error value

public:
    PIController(double kp, double ki) : kp(kp), ki(ki), integral(0.0), lastError(0.0) {}
};
```

```
void setSetpoint(double sp) {
    setpoint = sp;
}

double update(double measuredValue, double dt) {
    double error = setpoint - measuredValue; // Compute error
    integral += error * dt; // Accumulate the integral
    term
    double output = kp * error + ki * integral; // Calculate the control
    output

    // Implement anti-windup mechanism if needed here

    lastError = error; // Update the last error
    return output; // Return the control signal for the trailing edge
    flap
}

// Rest of the methods can be defined here
};

int main() {
    PController pi(0.1, 0.01); // Example values for kp and ki
    pi.setSetpoint(5.0); // Desired position in degrees for the trailing edge flap

    double dt = 0.01; // Time step for the simulation
    while (/* CFD simulation is running */) {
        double measuredValue = /* Logic to get the current position of the trailing edge
        flap */;
        double controlSignal = pi.update(measuredValue, dt);
        // Apply the control signal to adjust the position of the trailing edge flap
    }

    return 0;
}
```

2.2 Wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises

Die Hochschule München wurde mit einer Förderquote von 100 % gefördert. Wichtigster Posten war Personalausgaben.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts ARCTIS durchgeführten Arbeiten leisten einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Drehflüglern in der zivilen Luftfahrt. Insbesondere führen die Reduktion von Blattlasten sowie des Leistungsbedarfs von Hubschrauberrotoren nicht nur zu einer Verringerung des Wartungsaufwands, sondern ermöglichen zugleich einen nachhaltigeren Betrieb. Darüber hinaus trägt die Reduktion von Lärmemissionen zur Verbesserung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Hubschrauberluftfahrt bei.

Vor diesem Hintergrund waren die im Projekt durchgeführten Arbeitsschritte in vollem Umfang notwendig, um neue regelungs-basierte Ansätze zur Optimierung des Rotorbetriebs zu entwickeln. Eine zentrale Grundlage bildete die Ableitung geeigneter linearer Modelle der Rotordynamik, welche die Basis für die Entwicklung moderner Regelungsstrukturen zur Reduktion von Blattlasten und Lärm darstellt. Darauf aufbauend wurden modellbasierte Regelungsansätze zur aktiven Last- und Lärmreduktion entwickelt. Ergänzend hierzu wurde eine Extremwertregelung zur Senkung des Leistungsbedarfs erarbeitet. Vergleichbare integrierte Ansätze zur Reglerauslegung waren zum Projektbeginn nicht verfügbar.

Der Umfang und die Tiefe der durchgeführten Arbeiten sind als angemessen zu bewerten, da sie sich gezielt auf die für die Fragestellung wesentlichen Aspekte konzentrieren und eine fundierte Bewertung der Machbarkeit sowie der Wirksamkeit der untersuchten Auslegungsstrategie ermöglichen. Die Entwicklung realistischer Modelle der Rotordynamik war dabei erforderlich, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Eine wesentliche und notwendige Herausforderung bestand des Weiteren in der Ableitung von Modellen, die die Wechselwirkungen zwischen Aerodynamik, Blattlasten und Rotorleistung in einer für die Reglerauslegung geeigneten Form abbilden, um die entwickelten Regelungskonzepte zielgerichtet auslegen und zuverlässig verifizieren zu können.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die im Projekt ARCTIS erzielten Ergebnisse bieten ein erhebliches Potenzial für die Weiterentwicklung moderner Drehflügler in der zivilen Luftfahrt. Die entwickelten regelungs-basierten Ansätze zur Reduktion von Blattlasten, Lärmemissionen und Leistungsbedarf tragen direkt zur Effizienzsteigerung, zur Verlängerung von Wartungsintervallen sowie zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Hubschraubern bei. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Erreichung zukünftiger Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit, Betriebskostenreduktion und gesellschaftlicher Akzeptanz.

Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse fließen über Vorlesungen und Projektarbeiten in die Ausbildung von Studenten an der Hochschule ein. Gleichzeitig bilden die Projektergebnisse eine zentrale Grundlage für die Promotion der im Projekt tätigen wissenschaftlichen Mitarbeiterin und tragen damit unmittelbar zur Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei. Die Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie deren Präsentation auf wissenschaftlichen Konferenzen gewährleisten zudem eine nachhaltige Verbreitung innerhalb der Fachgemeinschaft

Aufgrund des im Projekt verfolgten methodischen Ansatzes sind die im Projekt entwickelten Modellierungs- und Regelungsverfahren auf verschiedene Rotorkonfigurationen übertragbar und bieten damit eine mögliche Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Insgesamt leisten die im Projekt erzielten Ergebnisse einen nachhaltigen Beitrag zur Stärkung der wissenschaftlichen Kompetenz im Bereich der Modellierung und aktiven Rotorregelung für die Entwicklung effizienterer und umweltverträglicherer Luftfahrtsysteme.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle

Während der Durchführung sind keine Fortschritte anderer Stellen bekannt geworden, die zum Stand der Technik beitragen.

2.6 Veröffentlichungen

S. Wisbacher, J. Frey, H. Pfifer, D. Ossmann, „Data-Driven System Identification of an Active Helicopter Rotor Blade“, eingereicht bei: CEAS Aeronautical Journal

S. Wisbacher, D. Ossmann, „Optimized Model-Free Extremum Seeking Control for Morphing Rotor Systems“, eingereicht bei: 12th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT2026)

Literaturverzeichnis

- [1] K. Nguyen und I. Chopra, „Application of Higher Harmonic Control to Rotors Operating at High Speed and Thrust“, *J Am Helicopter Soc*, Bd. 35, Nr. 3, S. 78–89, Juli 1990, doi: 10.4050/JAHS.35.78.
- [2] S. A. Jacklin, A. Blass, Swanson, und D. Teyes, „Second test of a helicopter individual blade control system in the NASA Ames 40- by 80-foot wind tunnel“, NASA, American Helicopter Society 2nd International Aeromechanics Specialists’ Conference, Okt. 1995.
- [3] R. Jain, H. Yeo, und I. Chopra, „Computational Fluid Dynamics—Computational Structural Dynamics Analysis of Active Control of Helicopter Rotor for Performance Improvement“, *J. Am. Helicopter Society*, Bd. 55, Nr. 4, S. 042004, 2010, doi: 10.4050/JAHS.55.042004.
- [4] R. Jain, H. Yeo, und I. Chopra, „Examination of Rotor Loads due to On-Blade Active Controls for Performance Enhancement“, *Journal of Aircraft*, Bd. 47, Nr. 6, S. 2049–2066, Nov. 2010, doi: 10.2514/1.C000306.
- [5] K. Ravichandran, I. Chopra, B. E. Wake, und B. Hein, „Trailing-Edge Flaps for Rotor Performance Enhancement and Vibration Reduction“, *J Am Helicopter Soc*, Bd. 58, Nr. 2, S. 1–13, Apr. 2013, doi: 10.4050/JAHS.58.022006.
- [6] L. Liu, P. P. Friedmann, I. Kim, und D. S. Bernstein, „Rotor Performance Enhancement and Vibration Reduction in Presence of Dynamic Stall Using Actively Controlled Flaps“, *J. Am. Helicopter Society*, Bd. 53, Nr. 4, S. 338, 2008, doi: 10.4050/JAHS.53.338.
- [7] B. K. Woods, O. Bilgen, und M. I. Friswell, „Wind tunnel testing of the fish bone active camber morphing concept“, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Bd. 25, Nr. 7, S. 772–785, Mai 2014, doi: 10.1177/1045389X14521700.
- [8] A. E. Rivero, S. Fournier, M. Manolesos, J. E. Cooper, und B. K. S. Woods, „Experimental Aerodynamic Comparison of Active Camber Morphing and Trailing-Edge Flaps“, *AIAA Journal*, Bd. 59, Nr. 7, S. 2627–2640, Juli 2021, doi: 10.2514/1.J059606.
- [9] S. Kumar, D. Komp, M. Hajek, und J. Rauleder, „Effect of Active Camber on Rotor Noise, Power and Hub Vibration“, in *AIAA Scitech 2021 Forum*, VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2021. doi: 10.2514/6.2021-1927.
- [10] S. Wisbacher, D. Ossmann, S. Schubert, J. Frey, und H. Pfifer, „Wind Tunnel Based System Identification of a Small Unmanned Aircraft System“, in *AIAA SCITECH 2025 Forum*, Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2025. doi: 10.2514/6.2025-0857.
- [11] A. Franke, M. Guist, S. Wisbacher, D. Ossmann, und H. Pfifer, „Flight Test Based System Identification of an Unmanned Fixed-Wing Aircraft“, gehalten auf der EuroGNC, 2026.
- [12] S. J. Qin, „An overview of subspace identification“, *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 30, Nr. 10–12, S. 1502–1513, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.05.045.
- [13] M. Verhaegen, „Subspace Techniques in System Identification“, in *Encyclopedia of Systems and Control*, J. Baillieul und T. Samad, Hrsg., London: Springer London, 2014, S. 1–13. doi: 10.1007/978-1-4471-5102-9_107-1.

- [14] L. Ljung, *System identification: theory for the user*, 2nd ed. in Prentice Hall information and system sciences series. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.
- [15] D. Komp, S. Kumar, M. Hajek, und J. Rauleder, „Effect of active camber morphing on rotor performance and control loads“, *Aerospace Science and Technology*, Bd. 108, S. 106311, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ast.2020.106311.
- [16] F. Thiele, S. Wisbacher, S. Diaconescu, D. Ossmann, und H. Pfifer, „Periodic LQG Wind Turbine Control with Adaptive Load Reduction“, *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 56, Nr. 2, S. 7674–7679, 2023, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1168.
- [17] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, und B. A. Francis, „State-space solutions to standard H_2 and H_∞ / control problems“, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Bd. 34, Nr. 8, S. 831–847, Aug. 1989, doi: 10.1109/9.29425.
- [18] F. Biertümpfel, S. Wisbacher, H. Pfifer, und D. Ossmann, „Periodic Robust Control of a Wind Turbine“, in *AIAA SCITECH 2024 Forum*, Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2024. doi: 10.2514/6.2024-2298.
- [19] F. Thiele und H. Pfifer, „ARCTIS - Periodische Regelung eines Rotors mit formadaptivem Wölbungs-Mechanismus“, Dez. 2025, doi: 10.34657/27116.
- [20] J. Theis, H. Pfifer, und P. Seiler, „Robust Modal Damping Control for Active Flutter Suppression“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 43, Nr. 6, S. 1056–1068, Juni 2020, doi: 10.2514/1.G004846.
- [21] F. Gandhi, „Lead-Lag Control for Helicopter Vibration and Noise Reduction“. 1. Januar 1995. Zugegriffen: 29. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000072489>