

Einfluss des Triebstrangs auf die Schwenkbewegung von Hubschrauberrotoren

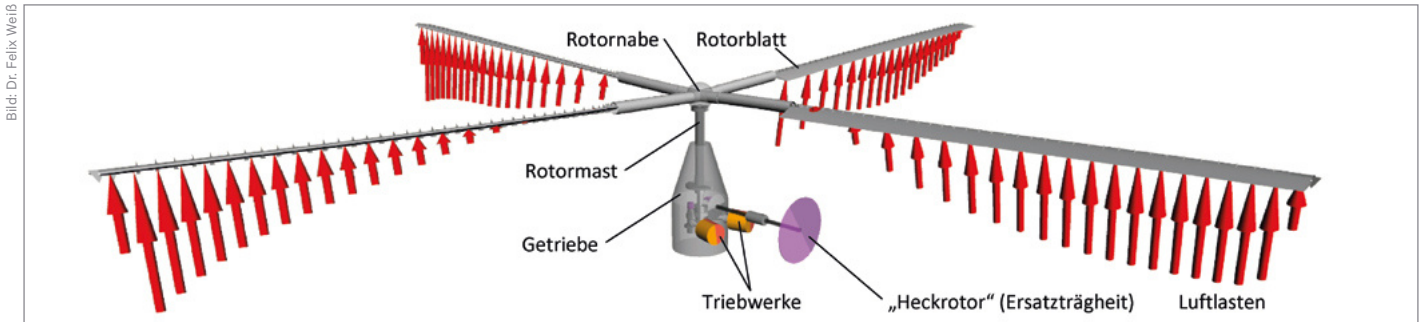


Abbildung 1: Visualisierung des Rotor-Triebstrang-Systems unter Luftlasten

Anmerkung der Redaktion: Mit unserem technischen Artikel bieten wir in jeder Ausgabe Platz für ein wissenschaftliches Exposé. Dabei ist die anfängliche Zusammenfassung technisch allgemein verständlich gehalten und liefert einen Überblick über die wissenschaftliche Arbeit.

strang-Interaktion sowie der Identifikation von Modellierungsanforderungen zur Abbildung dieses Phänomens leistet die Simulationsstudie am Beispiel des Eurocopter Bo105 einen Beitrag zur Erweiterung der Simulationsfähigkeit im Bereich der Hubschrauberrotor-Aeromechanik.

Eigenfrequenz nahe der Blattzahlharmonischen liegt und die durch den Triebstrang modifiziert wird. Schließlich wird gezeigt, dass die Berücksichtigung des Triebstrangs die Korrelation simulierter Schwenklasten mit Messungen aus einem Windkanalversuch verbessert.

Zusammenfassung

Wie wirken sich strukturdynamische Schwingungen des Triebstrangs – bestehend unter anderem aus Rotormast, Getriebe und Triebwerken – auf die Dynamik des Hauptrotors aus? Da die meisten rotordynamischen Simulationen auf der Annahme einer konstanten, ungestörten Drehzahl der Rotornabe basieren, ist der Triebstrangeinfluss in diesen Studien von vornherein unberücksichtigt. Mit der systematischen Analyse der Rotor-Trieb-

In der Arbeit „Einfluss des Triebstrangs auf die Schwenkbewegung von Hubschrauberrotoren“ [1][2] wird der Einfluss der Trägheits- und Steifigkeitseigenschaften des Triebstrangs auf die Struktureigenmoden des Rotors identifiziert und der Einfluss dieser Eigenmoden auf die resultierenden strukturellen Lasten in den Rotorblättern gezeigt. Der Triebstrang bewirkt beachtliche Änderungen der Lastamplituden in Schwenkrichtung¹ mit blattzahlharmonischer² Frequenz. Diese Änderungen lassen sich auf die zweite kollektive³ Schwenkmode zurückführen, deren

Strukturmodellierung und -analyse

Im ersten Schritt wird untersucht, wie der Triebstrang die Struktureigenmoden des Rotors ohne Einwirkung der Aerodynamik beeinflusst. Vereinfachend wird ausschließlich die Kopplung im rotatorischen Freiheitsgrad der Nabe (Azimut Ψ , Winkelgeschwindigkeit Ω) betrachtet. Der Triebstrang wird als diskrete Torsionsschwingerkette im Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK modelliert. Er verfügt über 16 Trägheits- und dazwischenliegen-

Basismodell $\Omega = \text{konst.}$		Primäre Beiträge	Rotor-Triebstrang		
Mode	$\omega / \Omega_{\text{ref}}$		Mode	$\omega / \Omega_{\text{ref}}$	
L1 (4x)	0,67	→	RD _{HeR}	0,60	→ $\omega \uparrow$ (Faktor 1,5) ⇒ Trägheitseffekt dominiert.
F1 (4x)	1,11		L1 (3x)	0,67	
F2 (4x)	2,73	→	RD _{L1}	1,02	→ $\omega \downarrow$ (Faktor 0,8) ⇒ Steifigkeitseffekt dominiert.
T1 (4x)	3,67		F1 (4x)	1,11	
L2 (4x)	4,33	→	F2 (4x)	2,73	
...	...		RD _{L2}	3,52	
			T1 (3x)	3,67	
			RD _{T1}	3,68	
			L2 (3x)	4,33	
			

Abbildung 2: Vergleich der Eigenfrequenzen von Basismodell und gekoppeltem Rotor-Triebstrang-System bei Nenndrehzahl $\Omega = \Omega_{\text{ref}}$. L = Lead-lag (Schwenk), F = Flap (Schlag), T = Torsion, RD = Rotor-Drivetrain, HeR = Heckrotor. Der Vier-Blatt-Rotor hat jeweils vier Moden (kollektiv, longitudinal, lateral und differenziell), von denen nur die kollektive Mode mit dem Triebstrang koppeln kann (RD-Mode); die anderen bleiben unverändert

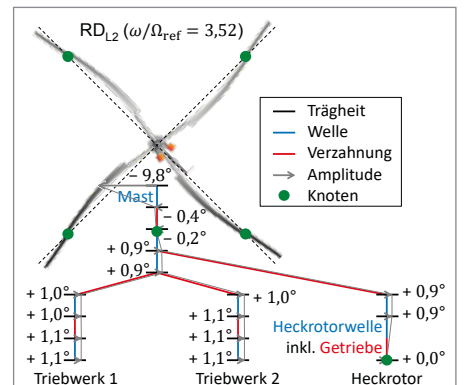


Abbildung 3: Eigenform der RD_{L2}-Mode

¹ „Schwenken“ ist die Blattbewegung in der Rotorebene. „Schlagen“ ist die Bewegung aus der Rotorebene heraus.
² „Blattzahlharmonische“ beim Vier-Blatt-Rotor der Bo105: vier Schwingungen pro Umdrehung, kurz 4/r.
³ „Kollektiv“ bedeutet, dass alle Rotorblätter gleichsinnig schwingen.

de Steifigkeitselemente, die die Flexibilität von Wellen und Verzahnungen abbilden. Die Rotorblätter werden jeweils durch mehrere 1D-Bernoulli-Balkensegmente mit dem SIMPACK-internen Balkenmodul SIM-BEAM modelliert.

Die Eigenfrequenzen des Rotor-Triebstrang-Systems ergeben sich nach Linearisierung und Modalanalyse bei Rotornenn-drehzahl $\Omega = \Omega_{ref}$ – aber mit erlaubten Störungen um diese Drehzahl, siehe **Abbildung 2**, rechts. Zur Referenz wird eine Modalanalyse des Rotormodells ohne Triebstrang mit konstanter, störungsfreier Nabendrehzahl durchgeführt („Basismodell“, **Abbildung 2**). Der Vergleich des Rotor-Triebstrang-Systems mit dem Basismodell liefert den Triebstrangeinfluss. Die durch den Triebstrang veränderten Moden werden als *Rotor-Drivetrain (RD)* bezeichnet.

Die zweite kollektive Schwenkmode L2 (L für *Lead-lag*) ist in dieser Studie von besonderer Bedeutung. Ihre dimensionslose Eigenfrequenz liegt im Basismodell bei $\omega_{L2}/\Omega_{ref} = 4,33$. Der Triebstrang bewirkt eine Verminderung auf das 0,8-fache: Im Rotor-Triebstrang-System beträgt die Eigenfrequenz $\omega_{RD,L2}/\Omega_{ref} = 3,52$. Vorstudien in [1] zeigen, dass Erhöhungen der Schwenkeigenfrequenz (wie etwa von L1 nach RD_{L1}) auf den Einfluss finiter Trägheit zurückzuführen sind, während Verminderungen durch die finite Steifigkeit des Triebstrangs begründet sind (beim Basismodell sind Trägheit und Steifigkeit unendlich). Im Fall von RD_{L2} dominiert also offensichtlich der Steifigkeitseffekt.

Abbildung 3 zeigt die Eigenform der RD_{L2} -Mode. Darin ist die Draufsicht des Hauptrotors mit der Darstellung der Verdrehwinkelamplituden der Trägheitselemente im Triebstrang kombiniert. Diese sind zur Vergleichbarkeit gemäß Getriebeübersetzung auf die Hauptrotordrehzahl skaliert. Im Rotor ist die gegenüber L2 veränderte Biegelinie (fehlender Wendepunkt) zu erkennen – sie ähnelt eher der Biegelinie der

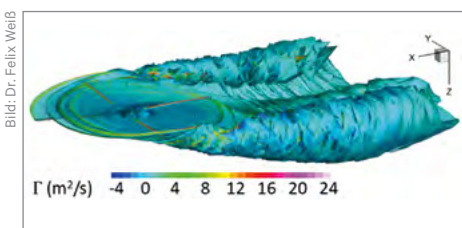


Abbildung 5: Free-Wake-Visualisierung im Langsamflug mit Zirkulationsverteilung Γ

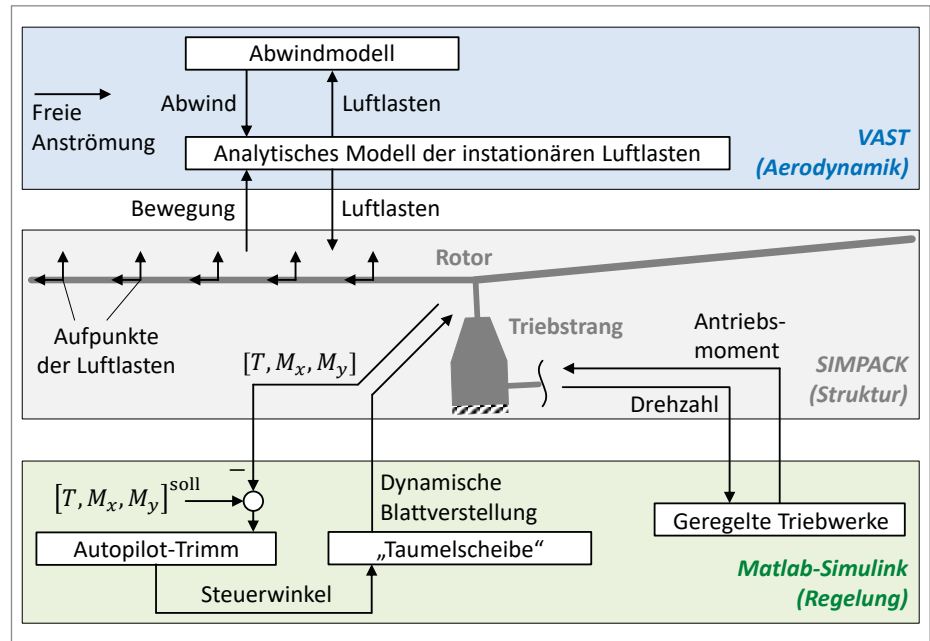


Abbildung 4: Simulationsumgebung: T = Rotor Schub, M_x = Rotorrollmoment, M_y = Rotornickmoment

ersten Schwenkmode L1 mit freier Verdrehung an der Blattwurzel. Im Triebstrang konzentriert sich die Deformation im Wesentlichen auf den Rotormast. Dessen Flexibilität erlaubt eine ausgeprägte Schwingung der Rotornabe, während die Trägheiten des Triebstrangs nur geringe Amplituden aufweisen.

Aeromechanische Simulation

Die aeromechanische Untersuchung des Rotor-Triebstrang-Systems erfolgt durch nichtlineare Simulationen im Zeitbereich. Die Simulationsumgebung besteht, wie in **Abbildung 4** illustriert, aus drei Programmen. SIMPACK (mittlerer Block) beinhaltet das oben beschriebene Strukturmodell des Rotor-Triebstrang-Systems.

Die aerodynamischen Modelle, also Luftlasten- und Abwindmodell, sind im *Versatile Aeromechanics Simulation Tool (VAST)* [3] implementiert, siehe oberer Block. Gemäß der Blattelementtheorie wird jedes Rotorblatt in 20 Elemente unterteilt. An jedem Aufpunkt werden die instationären Luftlasten durch ein semiempirisches, analytisches Modell berechnet. Der Abwind des Rotors wird entweder durch ein *Generalized-Dynamic-Wake-Modell (GDW)* [4] oder – für wenige Rechnungen – durch ein höherwertiges *Free-Wake-Modell (FW)*, das auf [5] basiert, simuliert. In SIMPACK werden die Bewegungen der Aufpunkte auf den Rotorblättern ausgewertet und an VAST übergeben. Unter Berücksichtigung der freien

Anströmung sowie des jeweils individuellen Abwinds an den Aufpunkten berechnet VAST die Normal- und Tangentialkräfte sowie Nickmomente, die wiederum an den Aufpunkten in SIMPACK angetragen werden.

Die Regelung des Rotor-Triebstrang-Systems erfolgt im Programm MATLAB-Simulink (unterer Block). Hier arbeiten zwei Regelschleifen parallel: Zum einen werden die Steuerwinkel durch ein Autopilot-Trimmmverfahren eingestellt. Trimmziel ist das Erreichen eines definierten Schubs T , Rollmoments M_x und Nickmoments M_y des Rotors. Die Steuerwinkel werden durch ein funktionales Taumelscheibenmodell in die dynamische Blattverstellung überführt, die Eingang des Strukturmodells ist. Zum anderen wird die Drehzahl des Rotor-Triebstrang-Systems durch Modelle der geregelten Triebwerke nachgeführt.

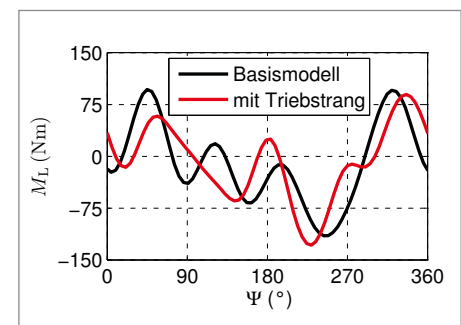


Abbildung 6: Schwenkbiegemoment M_L im Rotorblatt über eine Rotordrehung (Rotorazimut Ψ) an der Radialstelle $r/R = 0,57$ (also bei 57 % des Rotorradius), Abwindmodell GDW

Bild: Dr. Felix Weiß

Bild: Dr. Felix Weiß

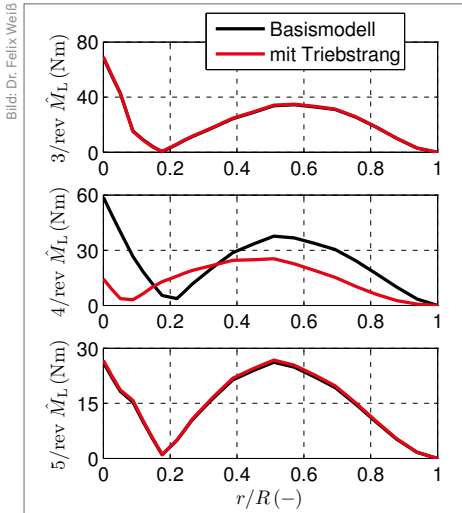


Abbildung 7: Radiale Verläufe der 3/rev-, 4/rev- und 5/rev-Schwenkbiegemomentamplituden \hat{M}_L entlang des Rotorblatts, Abwindmodell GDW

Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen Langsamflug mit einem geringen Fortschrittsgrad⁴ von $\mu = 0,1$ und einer moderaten spezifischen Rotorblattbelastung⁵ von $C_T/\sigma = 0,075$. **Abbildung 5** zeigt für diesen Flugzustand das konvektierte Wirbelgitter des Free-Wake-Abwindmodells mit farblicher Darstellung der Zirkulation Γ .

Einfluss des Bo105-Triebstrangs

Die über eine Rotorumdrehung auftretenden Schwenkbiegemomente M_L im Rotorblatt mit und ohne Triebstrang werden in **Abbildung 6** verglichen.

Die Verläufe sind ähnlich, unterscheiden sich jedoch im höherharmonischen Inhalt des Signals, für dessen Bewertung eine Fourieranalyse durchgeführt wird. **Abbildung 7** zeigt beispielhaft die radialen Verläufe der 3/rev-, 4/rev- und 5/rev-Amplituden von M_L . 3/rev bezeichnet beispielsweise die dreifache Rotorfrequenz, also drei Schwingungsdurchgänge pro Umdrehung. Der Triebstrang wirkt sich ausschließlich auf die Blattzahlharmonische 4/rev aus. Der Grund ist, dass jegliche aerodynamische Anregung von Rotor-Triebstrang-Moden mit der Frequenz der Blattpassage (vierfache Rotorfrequenz, also 4/rev) erfolgt; jedes Rotorblatt trägt gleichermaßen zur Anregung bei, jedoch phasenversetzt zu den anderen Blättern. Die dynamische Antwort der Rotor-Triebstrang-Moden auf diese Anregungen macht den Unterschied der Schwenkbiegemomentamplituden im Vergleich zum

Basismodell aus. Je nach Radialstelle kann der Triebstrang eine Erhöhung oder eine Verminderung der Amplitude bewirken, siehe **Abbildung 7, Mitte**.

Triebstrangvariation

Der Grund für die besondere Bedeutung der RD_{L2} -Mode bei der Analyse des Triebstrangeinflusses liegt gerade darin, dass ihre Eigenfrequenz nahe der Blattzahlharmonischen liegt und sie daher maßgeblich angeregt wird. In diesem Abschnitt wird demonstriert, welchen Einfluss eine Variation der Eigenfrequenz $\omega_{RD_{L2}}$ auf die 4/rev-Amplitude des Schwenkbiegemoments hat. Für diese Variation wird ein reduziertes Triebstrangmodell aus nur einem Trägheitselement J_{DT} (DT für Drivetrain) und einem Steifigkeitselement k_{DT} verwendet. Zunächst werden die beiden Parameter dahin gehend angepasst, dass $\omega_{RD_{L2}}$ identisch zum vollständigen Triebstrangmodell ist. Wie in [1] gezeigt wird, sind dann auch die resultierenden Schwenklasten mit Triebstrang identisch. Anschließend wird k_{DT} über mehrere Größenordnungen variiert. Dadurch ergeben sich Eigenfrequenzen im Wertebereich $3,17 < \omega_{RD_{L2}}/\Omega_{ref} < 4,51$. Dieser Bereich deckt alle konstruktionstechnisch umsetzbaren Triebstrangkonfigurationen ab.

Oben in **Abbildung 8** ist die 4/rev-Amplitude der Nabenwinkelgeschwindigkeit als Funktion von $\omega_{RD_{L2}}$ gezeigt. Die Verläufe mit variabler Triebstrangsteifigkeit (rot) weisen Ähnlichkeiten zum Amplitudengang eines schwingungsfähigen Systems zweiter Ordnung auf. Allerdings ist – umgekehrt zum Amplitudengang – auf der Abszisse die Eigenfrequenz aufgetragen, während die Anregungsfrequenz 4Ω konstant ist. Die in den vorherigen Abschnitten verwendeten Konfigurationen „Basismodell“ und „Bo105-Triebstrang“ sind durch ein blaues Dreieck bzw. ein grünes Quadrat markiert. Das Maximum der Rotor-Triebstrang-Interaktion tritt wie erwartet im Resonanzfall $\omega_{RD_{L2}}/\Omega_{ref} \approx 4$ auf, wo $\hat{\Omega}$ den 4-fachen Wert des Bo105-Triebstrangs annimmt. Eine sehr große Triebstrangsteifigkeit (ca. 14-mal steifer als der Bo105-Triebstrang) bewirkt eine Eigenfrequenz von $\omega_{RD_{L2}} = \omega_{L2} = 4,33 \Omega_{ref}$. Hierbei liegt ein Schwingungsknoten in der Rotornabe, womit Hauptrotor und Triebstrang dynamisch entkoppelt sind. Ebenso wie beim Basismodell ist die Schwingungsamplitude der Rotornabe an dieser Stelle null.

Im unteren Teil von **Abbildung 8** ist die ausgeprägte Abhängigkeit der 4/rev-Schwenkbiegemomentamplitude \hat{M}_L von $\omega_{RD_{L2}}$ zu erkennen. Die Verläufe der Graphen sind denen von $\hat{\Omega}$ sehr ähnlich. Die Bo105-Konfiguration weist die 0,6-fache Amplitude des Basismodells auf. Im Resonanzbereich hat \hat{M}_L den siebenfachen Wert des Basismodells.

Aus den Verläufen der Amplituden wird deutlich, dass die Eigenfrequenz der RD_{L2} -Mode nicht im Resonanzbereich (hier etwa 3,8/rev bis 4,2/rev) liegen sollte, was z. B. bei der Neuauslegung eines Rotor-Triebstrang-Systems zu beachten ist. Ähnlich wie $\hat{\Omega}$ und \hat{M}_L verhalten sich auch die 4/rev-Amplituden des Masttorsionsmoments in Abhängigkeit von $\omega_{RD_{L2}}$ (hier nicht gezeigt).

Verbesserung der Prognose

Abschließend wird gezeigt, dass die Berücksichtigung des Triebstrangs eine Maßnahme (neben vielen anderen) darstellt, um die Genauigkeit der Simulation zu erhöhen. Als experimentelle Referenz für die auftretenden Schwenklasten stehen Messungen einer Windkanalkampagne des vollskaligen Bo105-Rotors [6] zur Verfügung. Der im

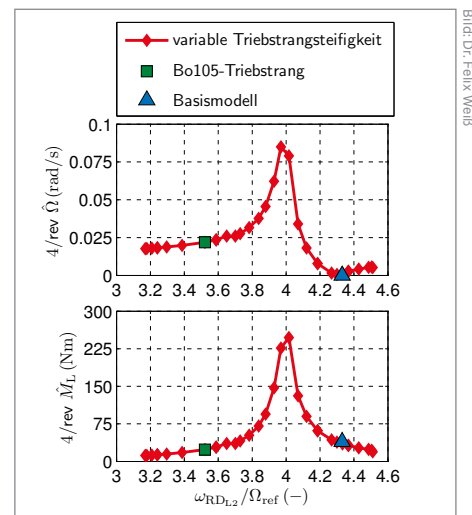


Abbildung 8: 4/rev-Amplituden der Nabenwinkelgeschwindigkeit (oben) und des Schwenkbiegemoments bei $r/R = 0,57$ (unten) in Abhängigkeit der Eigenfrequenz der RD_{L2} -Mode, Abwindmodell GDW

⁴ Der Fortschrittsgrad μ ist das Verhältnis aus Anströmgeschwindigkeit in der Rotorebene und Blattspitzengeschwindigkeit.
⁵ Der Quotient aus Schubbeiwert C_T und Flächendichte σ wird als spezifische Rotorblattbelastung bezeichnet. C_T/σ ist ein Maß für die aerodynamische Belastung des Rotors, z. B. um zu beurteilen, wann Strömungsablösung eintritt.

Bild: Dr. Felix Weiß

Bild: Dr. Felix Weiß

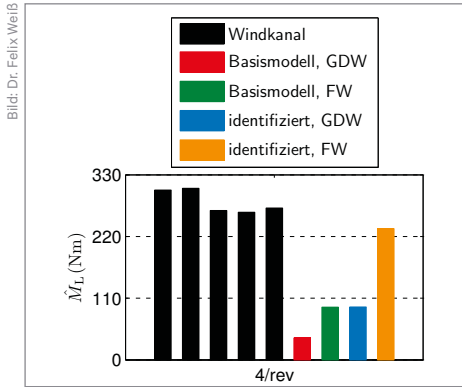


Abbildung 9: 4/rev-Amplitude des Schwenkbiegemoments bei $r/R = 0,57$: Vergleich zwischen Windkanalversuch (fünf Läufe), Basismodell und identifiziertem Triebstrang. Abwindmodelle GDW und FW

Windkanal verwendete Triebstrang unterscheidet sich von dem der Bo105, sodass ein identifiziertes Triebstrangmodell zum Einsatz kommt. In **Abbildung 9** werden die gemessenen 4/rev-Amplituden des Schwenkbiegemoments im Langsamflug mit den Ergebnissen vier verschiedener Simulationen verglichen. Neben der Erweiterung des Strukturmodells (Rotor-Triebstrang-System statt Basismodell) wird auch ein Upgrade des Abwindmodells (FW statt GDW) vorgenommen.

Das einfachste Modell ist das Basismodell mit GDW (rot). Das Upgrade des Abwindmodells (grün) wie auch die Berücksichtigung des Triebstrangs (blau) bewirken – jeweils einzeln angewendet – eine ähnliche Verbesserung der Prognose. Jedoch lassen sich nur durch Kombination beider Maßnahmen die im Windkanalversuch auftretenden Amplituden näherungsweise abbilden (gelb). Das lässt sich wie folgt erklären: Nur wenn die 4/rev-Anregung durch die Aerodynamik richtig simuliert wird, kann eine entsprechende 4/rev-Antwort des Strukturmodells erfolgen.

Abbildung 10 zeigt den zugehörigen azimutalen Verlauf des Schwenkbiegemoments mit FW-Abwind für das Basismodell und den identifizierten Triebstrang. Mit Triebstrang korrelieren nicht nur die Amplituden besser; auch die Phasenlage wird deutlich genauer prognostiziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Berücksichtigung des Triebstrangs im Strukturmodell essenziell sein kann. Die Ergebnisse sind außerdem ein Beispiel dafür, dass der Weg zu genaueren Simulationsprognosen häufig über multidisziplinäre Modellverbesserungen führt.

Fazit und Ausblick

Die erarbeiteten Zusammenhänge und Erkenntnisse leisten einen Beitrag zu zukünftigen Untersuchungen und Entwicklungen in Wissenschaft und Industrie. So gehen aus dieser Arbeit Kriterien hervor, die es erleichtern, die Notwendigkeit der Triebstrangmodellierung für die Simulation stationärer Flugzustände zu beurteilen. Soll der Triebstrang modelliert werden, so können Ingenieurinnen und Ingenieure auf die identifizierten Modellanforderungen zurückgreifen. Für die Entwicklung neuer Rotor-Triebstrang-Systeme ist die Sensitivität der Schwenklasten bezüglich Änderungen der Rotoreigenmoden sowie die Abhängigkeit dieser Eigenmoden von der Trägheit und Steifigkeit des Triebstrangs hilfreich.

Ein noch offenes Forschungsthema ist die Übertragung der Rotor-Triebstrang-Schwingungen auf die Zelle des Hubschraubers in Form von Vibrationen – einer der wichtigsten Designtreiber aktueller Hubschrauberentwicklungen. Hier sind blattzahlharmonische Schwingungen bedeutend, da sie – im Gegensatz zu vielen anderen Frequenzen – ungefiltert auf den Rumpf übertragen werden. Wie gezeigt wurde, werden gerade die blattzahlharmonischen Schwingungen der Nabendrehzahl und des Masttorsionsmoments maßgeblich durch den Triebstrang beeinflusst. Neben einem dreidimensionalen Triebstrangmodell zur Berücksichtigung der einzelnen Lasteinleitungspunkte können bei dieser Problemstellung auch translatorische Nabenschwingungen eine wichtige Rolle spielen. ●

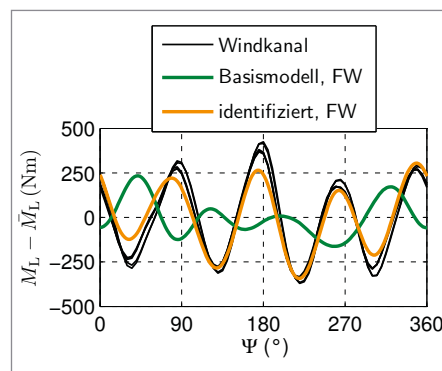


Abbildung 10: Schwenkbiegemoment bei $r/R = 0,57$: Vergleich zwischen Windkanalversuch (fünf Läufe), Basismodell und identifiziertem Triebstrang. Abwindmodell FW. Der Mittelwert \hat{M}_L ist aufgrund unterschiedlicher Nulldefinition in Windkanal und Simulation abgezogen

Literaturverzeichnis:

- [1] F. Weiß, „Einfluss des Triebstrangs auf die Schwenkbewegung von Hubschrauberrotoren“, Dissertation, TU Braunschweig, 2022
- [2] F. Weiß, „Einfluss des Triebstrangs auf die Schwenkbewegung von Hubschrauberrotoren“, in Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Stuttgart, Germany, Sep. 2023.
- [3] J. Hofmann, F. Weiß, und M. Mindt, „A New Approach to Comprehensive Rotorcraft Aeromechanics Simulation“, in VFS 77th Annual Forum, Online, Mai 2021.
- [4] C. He, „Development and Application of a Generalized Dynamic Wake Theory for Lifting Rotors“, Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1989.
- [5] B. G. van der Wall und M. Roth, „Free-Wake Analysis on Massively Parallel Computers and Validation with HART Test Data“, in AHS 53rd Annual Forum, Virginia Beach, Virginia, USA, Mai 1997.
- [6] S. A. Jacklin et al., „Investigation of a Helicopter Individual Blade Control (IBC) System in Two Full-Scale Wind Tunnel Tests: Volume I“, NASA, Washington, D. C., Technical Report TP-2003-212276, 2003.

DER AUTOR

Dr.-Ing. Felix Weiß studierte Maschinenbau und Luft- und Raumfahrttechnik an der RWTH Aachen mit einem Auslandsaufenthalt an der KTH Stockholm. 2015 kam er für seine Masterarbeit ans Institut für Flugsystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig, wo er im Anschluss in der Abteilung Hubschrauber promovierte. Seine Dissertation „Einfluss des Triebstrangs auf die Schwenkbewegung von Hubschrauberrotoren“ wurde 2023 mit dem Airbus-Dissertationspreis ausgezeichnet. Im Entwicklerteam des Versatile Aeromechanics Simulation Tools (VAST) ist Weiß für die Struktursimulation zuständig. Zu seinen Aufgaben gehören die Konzeptionierung und Implementierung des Strukturmodells, die Verifikation und Validierung von VAST sowie dessen Anwendung im Themenfeld der Aeromechanik von Hubschraubern.