

DLR-IB-FT-BS-2016-132

ABSCHLUSSBERICHT

Fortschrittliche-Taumelscheiben-Konzepte - Erprobung der Mehrfachtaumelscheibe im Windkanal (FTK-META-WK)

Interner Bericht

Autoren: Rainer Bartels
Philip Küfmann
Oliver Schneider



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht

DLR-IB-FT-BS-2016-132

ABSCHLUSSBERICHT

Fortschrittliche-Taumelscheiben-Konzepte – Erprobung der Mehrfach- taumelscheibe im Windkanal (FTK-META-WK)

Rainer Bartels
Philip Kufmann
Oliver Schneider

Institut für Flugsystemtechnik (DLR FT)
Braunschweig

74	Seiten
85	Abbildungen
5	Tabellen
26	Literaturstellen

Stufe der Zugänglichkeit: I, intern und extern unbeschränkt zugänglich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abt. Hubschrauber
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

Braunschweig, 28.06.16

Unterschriften:

Stellv. Institutsleiter: Dr.-Ing. C. Keßler

Abteilungsleiter: Dipl.-Ing. M. Höfinger

Projektleiter:
& Verfasser Dipl.-Ing. R. Bartels

The image shows three handwritten signatures in blue ink, each written over a horizontal line. The top signature is 'C. Keßler', the middle one is 'M. Höfinger', and the bottom one is 'R. Bartels'.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**Abschlussbericht**

Zuwendungsempfänger (ZE): DLR, Institut für Flugsystemtechnik (FT)	Förderkennzeichen: 20H1105B
Verbund-/Vorhabenbezeichnung: <u>F</u> ortschrittliche- <u>T</u> aumelscheiben- <u>K</u> onzepte – Er- probung der <u>M</u> ehrfach <u>t</u> aumelscheibe im <u>W</u> ind- <u>k</u> anal (FTK-META-WK)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2012 bis 31.12.2015	
Berichtszeitraum: 01.01.2012 bis 31.12.2015	

Berichterstatter: Rainer Bartels DLR FT
Philip Küfmann DLR FT
Oliver Schneider DLR FT

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Flugsystemtechnik (FT)
Lilienthalplatz 7
D-38108 Braunschweig

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
2	Voraussetzungen	8
3	Planung und Ablauf	9
4	Wissenschaftlicher und Technischer Stand.....	13
5	Zusammenarbeit.....	14
6	Erzielte Ergebnisse	16
6.1	Arbeitspaket AP3.3.1: Vorbereitung WK-Versuche.....	16
6.1.1	Entwurf, Konstruktion, Bau und Test neuer moderner Modellrotorblätter	16
6.1.2	Instrumentierung und Tests der FTK-Blätter	17
6.1.3	Zerlegung, Inspektion, Wartung und Überarbeitung aller META-System-Komponenten	19
6.1.4	Arbeiten am Rotorversuchsstand (RVS).....	29
6.1.5	Kalibrierung der einzelnen Sensoren und Messsysteme	38
6.1.6	Aufnahme und Auswertung der Blatt-Drucksensor-Daten	41
6.1.7	TEDAS2-Konfigurationsprogramm	42
6.1.8	Konzeption, Beschaffung und Test von Dünnschichtsensortechnik	42
6.1.9	Erprobung der META in der Rotorhalle nach deren Wiederaufbau.....	47
6.2	Arbeitspaket AP3.3.2: Weiterentwicklung der Steuer- und Regelgesetze.....	52
6.2.1	Entwicklung von Steuergesetzen für lokale Pitchwinkeländerungen	52
6.2.2	Modifikation der Ansteuerung der Aktuatorik für 3/rev-Steuer im drehenden System ...	53
6.2.3	Erweiterung der META-Steuersoftware	55
6.3	Arbeitspaket AP3.3.3: Erprobung im Windkanal LLF des DNW	60
6.3.1	Aufbau im DNW	60
6.3.2	Messequipment des DNW	61
6.3.3	Testprogramm	62
6.4	Arbeitspaket AP3.3.4: Auswertung der Ergebnisse.....	64
6.4.1	Leistungsbedarf.....	64
6.4.2	Vibrationen	65
6.4.3	Lärm	67
6.4.4	SPR-Ergebnisse.....	69
7	Nutzen und Verwertbarkeit.....	72
8	Fortschritt bei anderen Stellen.....	72
9	Veröffentlichungen, Vorträge	73
10	Literaturliste	73
11	Liste der erstellten Dokumentation.....	74

Abkürzungsverzeichnis

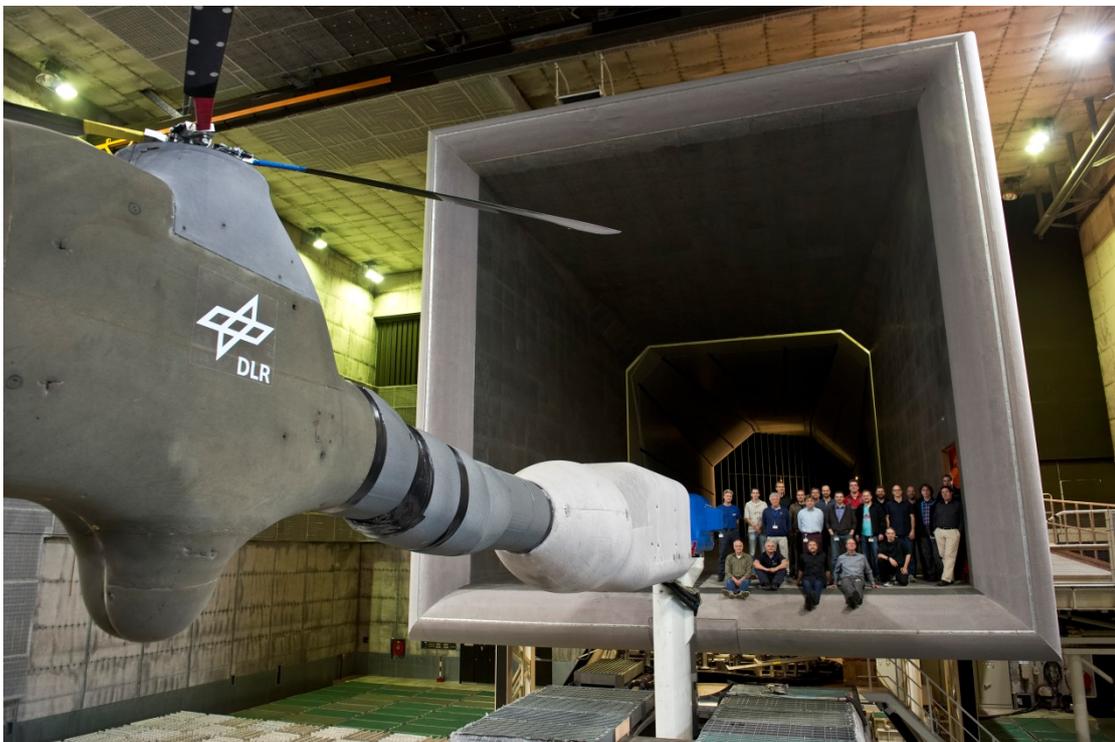
ABC	Active Blade Concept
ACTOR	Active Twist Optimized Rotor
AHD	AIRBUS HELICOPTES Deutschland GmbH
ATB	Active Twist Blade
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DNW	Deutsch-Niederländische Windkanäle
DSS	Dünnschichtsensoren
DTS	Doppeltaumelscheibe
EDS	External Data Server (externer Datenserver)
FA	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
FT	Institut für Flugsystemtechnik
FTK	Fortschrittliche Taumelscheibenkonzepte
HART	Higher Harmonic Control Aeroacoustics Rotor Test
HHC	Higher Harmonic Control
IBC	Individual Blade Control
InHuS	Innovative Steuerungssysteme für Hubschrauber
INROS	Innovative Rotorsysteme
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KARI	Korea Aerospace Research Institute
LARS	Lagerloses Aktives Rotorsystem
LLF	Large Low-Speed Facilities (Niedergeschwindigkeitswindkanal)
LuFo	Luftfahrtforschung, Luftfahrtforschungsprogramm
LVDT	Linear Variable Differential Transformer → Wegmesssensor
MBB	Messerschmitt-Bölkow-Blohm
META	Mehrfachtaumelscheibe
NASA/AFDD	National Aeronautics and Space Administration, Aeroflightdynamics Directorate
NHC	Non-Harmonic Control
NICETRIP	Novel Innovative Competitive Effective Tilt Rotor Integrated Project
Onera	Office National d'Études et de Recherches Aéropatiales
PID	Proportional-Integral-Derivative → klassischer Universalregler
RHA	Rekursive Harmonische Analyse
ROTEST	Rotorteststand
rpm	rounds per minute; Umdrehungen pro Minute
RVS	Rotorversuchsstand
S4	Rotorsimulationsprogramm des DLR-FT
SHT	Systemhaus Technik
STAR	Smart Twisting Active Rotor
TEDAS2	High-Speed Transputer Expendable Data Acquisition System, 2 nd Generation
TPP	Tip Path Plane
TS	Taumelscheibe
VAR	Voll-aktive Rotorsteuerung

Lateinische Symbole

A	Amplitude
$a_{i,n}$	Polynomkoeffizienten
F_k	Vibrationskoeffizient
F_n	Übertragungsfunktion
$F_{x,4}, F_{y,4}, F_{z,4}$	4/rev-Kräfte am Rotorkopf
K_n	Vertärkung
kN	Kilonewton
kV	Kilovolt
Ma	Machzahl
$M_{x,4}, M_{y,4}$	4/rev-Roll- und Nickmoment am Rotorkopf
p	Druck
R	Rotorradius
T	Temperatur
T_k	T-Matrix
R	Rotorradius
VI_4	Vibrationsindex
W_0	virtuelle Masse

Griechische Symbole

γ	Veränderung des statischen Blatteinstellwinkels
$\theta_0, \theta_C, \theta_S$	Fourier Koeffizienten des Blattsteuerwinkels
ϑ	Blattsteuerwinkel
φ	Blattsteuerphase
Ψ	Rotorazimut
ω	Frequenz
Ω	Rotordrehfrequenz



DLR-Windkanalmodell ROTEST in der 8m x 6m großen Messstrecke des DNW-LLF Teams des DNW und des DLR

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK:

Dieser Abschlussbericht beschreibt die vom DLR im Rahmen des Forschungsvorhabens FTK-META-WK im Zeitraum vom 01.01.2012 bis 31.12.2015 durchgeführten Arbeiten und wurde entsprechend den Vorgaben für Schlussberichte gemäß Nr. 8.2 NKBF 98 des BMWi angefertigt.

FTK steht als Akronym für Fortschrittliche Taumelscheiben-Konzepte und ist ein über das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW) gefördertes Vorhaben zwischen den Partnern AIRBUS HELICOPTERS Deutschland GmbH (AHD, Federführer) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). META-WK steht als Akronym für die Erprobung der Mehrfachtaumelscheibe im Windkanal, welche im LuFo IV-2 Vorgängerprogramm VAR (Voll-aktive Rotorsteuerung, 2009-2012) entwickelt, gebaut und auf dem Rotorversuchsstand in Braunschweig getestet wurde. Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt nur die vom Partner DLR durchgeführten Arbeiten. Die Inhalte der Arbeitspakete des DLR innerhalb des Vorhabens sind in Abschnitt 1 aufgeführt.

Detaillierte Informationen zu den erzielten Ergebnissen des DLR finden sich in Abschnitt 6 dieses Abschlussberichts bzw. können den einzelnen in Abschnitt [6] angegebenen Zwischenberichten entnommen werden.

1 Aufgabenstellung

Der Eigenantrag des DLR im Rahmen des LuFo IV-4 Verbundvorhabens FTK-META-WK umfasste ausschließlich Arbeiten des Instituts für Flugsystemtechnik (FT). Die mit dem Partner AHD abgestimmten und eng verzahnten Arbeiten des DLR Teilvorhabens liefen im Verbundvorhaben FTK als AP 3.3 *Windkanalversuche mit Modellrotor* innerhalb des Arbeitspakets AP3 – *Systemtests und Erprobung*. Die Inhalte der Arbeitspakete wurden wie folgt definiert:

AP3.3.1: Vorbereitung WK-Versuche

Die Vorbereitung der Windkanalversuche fand in Braunschweig statt. Hierfür mussten diverse Systeme für die im Anschluss folgenden Windkanalversuche modifiziert und einsatzbereit gemacht werden.

AP3.3.1.1 Adaption Rumpfmödel

Das Rumpfmödel des Rotorteststands (ROTEST) umfasst sämtliche Systeme des Windkanalmodells unterhalb des Rotors. Dieses besteht aus einer voll instrumentierten 6-Komponenten-Waage zur Erfassung der Kräfte und Momente des Gesamtsystems, einer leistungsstarken Hydraulikeinheit für den Antrieb des Rotors, einer Hydraulikversorgung inklusive Filtereinheit für den hydraulischen Teil der Aktuatoren, einer Getriebeeinheit, einem Schleifringssystem zur Übertragung von Messdaten vom drehenden in das nicht drehende System und Teilkomponenten des dynamischen Systems, welches auf die Waagenoberplatte montiert ist (für FTK: Rotorwelle, Mehrfachtaumelscheiben, Kardan-Stützen, Aktuatoren). Durch den Aufbau der META auf den Rotorversuchsstand im LuFo-IV-2-Vorläuferprogramm VAR-META wurde sowohl die Geometrie des Aufbaus als auch der elektrische und hydraulische Teil der Anlage derart modifiziert, dass das aus vorangegangenen Windkanal-Versuchen vorhandene Equipment für den Betrieb des Modells im Windkanal modifiziert werden musste. Dies betraf in erster Linie die Anpassung der Rumpfschale (aerodynamische Verkleidung des Rumpfes) sowie die elektrische und hydraulische Versorgung der neuen Komponenten.

AP3.3.1.2 Bau Modellrotorblätter

Im Rahmen eines separaten Unterauftrages wurde das DLR (Institute FA und FT, unterstützt durch AHD) beauftragt einen Modellrotorblattsatz für den Einsatz auf dem Rotorversuchsstand im DNW konstruktiv auszulegen. Dieser Blattsatz für modernere Rotoren sollte in diesem Arbeitspaket durch das DLR gefertigt werden. Die Fertigungsschritte umfassten den Bau einer Negativform, den Bau der Blattholme, der Blatthäute und der Blattanschlüsse, die Integration vorhandener Sensorik, Stecker, etc. sowie den Zusammenbau der Blattkomponenten. Anschließend wurden die fertigen

Blätter auf dem Rotorturm des DLR-FT Schleudertests unterworfen, bevor sie in die Vortests in AP3.3.1.7 auf dem RVS gebracht wurden. Für die Fertigung des Modellrotorblattsatzes wurden umfangreiche Eigenmittel des DLR bereitgestellt. Da Auslegung, Konstruktion, Bau und Test der Blätter im Rahmen eines Unterauftrages für AHD erfolgten, sind diese Arbeiten im Schlussbericht des Federführers AHD [16] beschrieben.

AP3.3.1.3 Integration und Erprobung DSS auf RVS

Das Institut FT untersucht im Rahmen verschiedener Programme und Projekte intensiv die Anwendbarkeit von sogenannten Dünnschichtsensoren (DSS) zur Erfassung von Lasten in dynamisch beanspruchten Bauteilen, wie Lagern etc.. Im vorliegenden Fall sollten die dynamischen Lasten innerhalb der Steuerstangen oberhalb der Taumelscheiben, als auch in den Aktuatoren unterhalb der Taumelscheiben erfasst werden. Die Sensoren sollten bei erfolgreichem Test die bisher verwendeten Dehnungsmessstreifen (DMS) ersetzen. Ziel war es mit Hilfe dieser neuartigen und sehr rauscharmen Sensorik ein besseres Hilfsmittel zur Stallerkennung, Lagerüberwachung oder auch als Reglerückführgröße zur Steuerstangenlastreduktion zur Verfügung zu haben.

AP3.3.1.4 Anpassung Mess-, Datenerfassungs- und RVS-System

Das Mess- und Datenerfassungssystem des Rotorversuchsstandes muss für jeden Versuch mehr oder weniger aufwändig angepasst werden. Durch die Umrüstung des RVS mit der META erhöhte sich der steuer- und messtechnische Aufwand. Für die im Windkanal geplanten Versuche waren mehr Messkanäle aus dem drehenden System vorgesehen (u.a. Blattdrucksensoren) als bei den Vortests im Vorläuferprogramm VAR-META. Aus diesem Grund musste das Verteilersystem im Rotorkopf, als auch zum Schleifring hin hardwaretechnisch erweitert werden. Zur Steuerung und optischen Überwachung der Ansteuerung der Mehrfachtaumelscheibe im Windkanal mussten die Pilotierungs-Displays für den Steuerstand des Rotorversuchsstands entsprechend modifiziert werden. Gleichzeitig wurde die Datenerfassung an das modifizierte System angepasst und programmiert.

AP3.3.1.5 Überarbeitung Ansteuer- und Sicherheitskonzept

Das System der Mehrfachtaumelscheibensteuerung besteht im Prinzip aus zwei unabhängigen Einzeltaumelscheiben. Diese könnten theoretisch bei stark unterschiedlicher Ansteuerung an bestimmten Punkten miteinander kollidieren. Durch die Konstruktion ist eine Freigängigkeit der Taumelscheiben für den gesamten Betriebsbereich inklusive Sekundärsteuerfunktionen plus Sicherheitskonzept gegeben. Wird dieser Bereich überschritten, greift ein mittels Sensorik überwachtes Sicherheitskonzept, das den Piloten bei Fehlern in der Ansteuerung (Klemmung, Gefahr der Kollision o.ä.) optisch informiert und die höheren Moden der Steuerung deaktiviert. Für den Einsatz im Windkanal musste dieses Konzept überarbeitet und die Ansteuerlogik erweitert werden.

AP3.3.1.6 Aufstellen Testmatrix

Die Windkanalversuche umfassten eine Vielzahl von Zielen, von IBC/HHC-Versuchen mit 2/rev-5/rev-Einsteuern zur Vibrations- und Lärmreduktion sowie zur Leistungsverbesserung über die Regelung des individuellen Blattspurlaufs zur Vibrationsreduktion bis hin zur Erprobung eines neuen Verfahrens zur BVI-Reduktion mit Hilfe von TPP-Splitting bei unterschiedlichen Flugbedingungen (Steig-/Sinkflug, Horizontalflug, Hochgeschwindigkeitsflug). Für einen möglichst effizienten und erfolgreichen Ablauf der Windkanal-Versuche wurde in enger Abstimmung mit dem Partner AHD eine Testmatrix erstellt, die diese Versuchspunkte priorisieren und sinnvoll koordinieren sollte.

AP3.3.1.7 Vortests in Rotorhalle

Bei den Vortests in der Rotorhalle des DLR-FT wurden sämtliche im Windkanal zur Erprobung zu bringende Steuerfunktionen unter Schwebeflugbedingungen mit beiden Blattsätzen getestet. Außerdem wurde in diesem Arbeitspaket eine Schulung des Bedienpersonals des Rotorversuchsstandes und der Experimente durchgeführt.

AP3.3.2: Weiterentwicklung der Steuer- und Regelgesetze

AP3.3.2.1 Modifikation Rotorsimulationsprogramm S4

Zur Vorhersage und zwecks Nachrechnung der neuen im Windkanal-Versuch zu testenden Funktionen zur individuellen Ansteuerung der Rotorblätter beim TPP-Splitting und beim Blattspurlauf benötigt man ein Simulationstool, das diese Funktionen unterstützt. Das Rotorsimulationsprogramm S4 musste zu diesem Zweck von einer Mehrblattsimulation mit identischen Blättern auf eine Einzelblattsimulation mit unterschiedlichen Blättern umprogrammiert werden. Dafür mussten auch die verwendeten Abwindmodelle modifiziert werden. Nur so können z.B. die Auswirkungen der geänderten Bahnen der von den Blättern abgehenden Blattspitzenwirbel richtig erfasst werden.

AP3.3.2.2 HHC/IBC-Echtzeit-Steuer Gesetze

Die Echtzeitsteuerung des Modells erfolgt mit Hilfe einer Matrixsteuerung, bei der als Steuer Gesetz ein vereinfachter Zusammenhang zwischen Blattwinkel und Aktuatorlänge hergestellt wird. Bei herkömmlichen Steuerungen dieser Art ist die Steuer Matrix eine 3x3-Matrix und der Zusammenhang linear, was in der Regel für die Basissteuerung als hinreichend genau angenommen wird. Bei großen Blattwinkeln und entsprechend geneigten Taumelscheiben treten jedoch immer stärker werdende Nichtlinearitäten auf, so dass Steuerfehler von bis zu 1° Blattwinkel entstehen können. Für Messungen mit der META ist das nicht hinreichend genau, so dass die Steuer Matrix auf nichtlineare Terme erweitert werden musste. Für die 2/rev-5/rev HHC/IBC-Untersuchungen war dies ohnehin erforderlich. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse konnte die Anzahl der Zeilen- und Spaltenelemente der Steuer Matrix so begrenzt werden, dass Echtzeitanwendungen problemlos möglich sind, ohne dabei ein Mindestmaß an Steuergenauigkeit zu verlieren. Für Anwendungen mit einer geplanten Steuer-Taktfrequenz von 4,5kHz (256 Pulse pro Umdrehung und ca. 17,5 Rotordrehungen pro Sekunde) ist dies unumgänglich. Die Steuer Gesetze verändern sich mit der Geometrie der Steuerung. Da die Steuerstangen mit neuer Sensorik (DSS) ausgestattet werden sollten, ändert sich die Basislänge von Steuerstangen und Aktuatoren, wodurch die Steuer Matrizen adaptiert werden müssen.

AP3.3.2.3 Weiterentwicklung Blattspurlaufregler

Der im Vorläuferprogramm VAR-META entwickelte Blattspurlaufregler konzentriert sich auf die Regelung der 1/rev-Lasten im stehenden System infolge ungleichförmigen Spurlaufs mehrerer Blätter mittels individuellen 0/rev Blattsteuersignalen. Dieses Konzept sollte auf höhere Blattsteuerfrequenzen und Messsignale ausgeweitet werden, um es somit in einen allgemeinen Vibrationsregler zu überführen.

AP3.3.2.4 Weiterentwicklung TPP-Steuer Gesetze

Mit Hilfe von 0/rev bis 2/rev-Signalen können die Blattspitzenebenen derart aufgesplittet werden, dass in der Höhe versetzte Flugbahnen der vom Blatt abgehenden Blattspitzenwirbel resultieren, die einen gezielten Einfluss auf die BVI-Lärmabstrahlung haben. Der bisherige Ansatz war, je zwei gegenüber liegenden Blättern unterschiedliche 0/rev - 2/rev Steuersignale zu geben, so dass effektiv zwei 2-Blattroten entstehen, die verschiedene Blattspitzenebenen aufweisen. Hier wurden im Rahmen der Steuermöglichkeiten weitere Kombinationen von Blattspitzenebenen sowie die gezielte Entkopplung aller Blätter (Einzelblattspitzenebenen) steuertechnisch vorbereitet.

AP3.3.3: Erprobung im Windkanal LLF des DNW

Im Rahmen der Windkanalversuche war im Einzelnen geplant, HHC-Versuche mit höheren Steuerfrequenzen (2-5/rev) zur Lärm-, Vibrations-, Lasten- und Leistungsreduktion durchzuführen sowie die Erprobung eines Konzepts zur Blattspurlaufregelung, das sowohl zum Inflight-Blade-Tracking, als auch zum Ausgleich von Massenunwuchten verwendet werden kann, als auch die Erprobung einer innovativen Steuerung zum Tip-Path-Plane-Splitting (TPP-Splitting, 0-2/rev) als mögliches neues Konzept zur Reduktion des Blattwirbel-Interaktionslärms (BVI-Lärm). Diese Tests waren ursprünglich in der ersten Jahreshälfte von 2014 in der offenen Konfiguration (8m x 6m Querschnittsfläche) der schallgedämpften Messhalle des LLF für die Dauer von 10 Messtagen geplant. Dabei war beabsichtigt Messungen im Schwebeflugzustand sowie bei Windgeschwindigkeiten von 33m/s bis 76m/s durchzuführen. Sämtliche Versuche wurden sowohl mit einen bewährten Bo105-

Modellrotor-Blattsatz als auch mit dem neu konstruierten und gebauten moderneren 2. Blattsatz (vgl. AP 3.3.1.2) durchgeführt. Im Einzelnen waren das:

AP3.3.3.1 2/rev-HHC-Versuche

Diese Versuche dienten der Unterstützung und Flankierung der bei AHD geplanten Untersuchungen zur 2/rev-Taumelscheibe (Doppeltaumelscheibe – DTS) innerhalb FTK und ergänzen die in den HART-Programmen erzeugten HHC-Versuchsdaten. Mit Hilfe von 2/rev-Signalen kann sowohl der BVI-Lärm im Landeanflug als auch der Leistungsbedarf im schnellen Vorwärtsflug adressiert werden. Gleiches gilt auch für die Stallreduktion im schnellen Vorwärtsflug und leicht eingeschränkt für die Beeinflussung von Vibrationen.

AP3.3.3.2 HHC-Versuche (3-5/rev) zur Lärm- und Vibrationsreduktion

Bei diesen Versuchen ging es um die Erprobung der restlichen in AP3.3.3.1 nicht angewendeten Frequenzen. Ziel war es mittels Amplitudenvariation und Phasensweeps bei niedrigen Geschwindigkeiten im Steig-/Sinkflug, sowie im hohen wie sehr hohen Geschwindigkeitsbereich mittels 3-5/rev-Einsteuerungen Einfluss auf Vibrationen und Lärm zu nehmen. Diese Versuche dienten teilweise als Abgleich mit den HHC-Versuchsdaten der HART-Programme.

AP3.3.3.3 Blattspurlaufregelung (Inflight-Blade-Tracking, Ausgleich von Massenunwuchten)

In diesem Arbeitspaket sollte der im Vorläuferprogramm VAR-META entwickelte Blattspurlaufregler unter verschiedenen stationären Flugbedingungen (Schwebeflug bis sehr schneller Horizontalflug) getestet werden. Dabei sollte der Regler sowohl an einem gut gewuchtet und getrackten, als auch an einem künstlich verstellten Rotor getestet werden.

AP3.3.3.4 TPP-Splitting

Das Konzept des TPP-Splitting soll zur Beeinflussung von BVI eingesetzt werden. Aus diesem Grund sollten diese Versuche mit 0-2/rev-TPP-Splitting im langsamen Sinkflug (bei max. BVI) und bei sehr hohen Horizontalfluggeschwindigkeiten (High-Speed-Impulsive Noise) durchgeführt werden.

AP3.3.4: Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung sämtlicher Ergebnisse erfolgte offline im Anschluss an die Versuche im Windkanal. Der Verbundführer AHD hat aufgrund der eigenen Untersuchungen und Entwicklungen zur 2/rev-Taumelscheibe (DTS) großes Interesse an den Ergebnissen der 2/rev-Versuche. Beim DLR gehört zu den Auswertungen sowohl die Validierung des DLR-Codes S4 anhand der Windkanal-Versuchsergebnisse als auch der Vergleich zu den Ergebnissen, die in den Programmen HART I und II erzeugt wurden.

2 Voraussetzungen

Zur erfolgreichen Durchführung des Projektes bzw. der Bearbeitung von AP3.3 waren mehrere Voraussetzungen gegeben. Die Funktionsfähigkeit der Mehrfachtaumelscheibe (META) als Konzept zur IBC-fähigen Rotorsteuerung ohne Aktuatorik im drehenden System, wurde bereits im Vorläuferprogramm VAR-META durch deren Konstruktion, Bau und Test in Braunschweig unter Schwebeflugbedingungen erfolgreich demonstriert [15]. Allerdings zeigten sich bei deren Erprobung auch kleinere Schwachstellen, deren Behebung bzw. Verbesserung Gegenstand diverser Aktivitäten in Arbeitspaket AP3.3.1 waren. Dafür musste das gesamte mechanische und teilweise auch elektrische System des Rotorversuchsstandes in seine einzelnen Komponenten zerlegt, überprüft/gewartet, sowie an Schwachstellen modifiziert/verbessert und wieder in einen funktionierenden Zustand für Vortests in Braunschweig zurückversetzt werden. Diese Aufgaben erwiesen sich als sehr zeitaufwendig, waren aber Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der geplanten Windkanal-Messkampagne.

Eine weitere Voraussetzung zur Durchführung der Windkanalversuche mit zwei verschiedenen Rotorblattsätzen war die erfolgreiche Auslegung, Konstruktion und Herstellung des neuen Modellrotorblattsatzes nach AHD-Vorgaben, was im Rahmen eines Unterauftrages bearbeitet wurde. Zwar

hatte das DLR auch vorher bereits Rotorblätter für den Rotorversuchsstand entwickelt, gebaut und getestet (z.B. für ERATO, ABC, STAR) nur waren dies ausschließlich Blätter für einen gelenkigen Rotorblattanschluss. Im Projekt FTK mussten Blätter für einen gelenklosen Rotor entwickelt und gebaut werden, wo beim DLR bis zum Projektbeginn keinerlei Erfahrungen mit der Auslegung, der Konstruktion und dem Bau vorlagen. Aus diesem Grund wurden regelmäßige Expertenrunden mit Beteiligten des Federführers (AHD), des DLR sowie externer technischer Berater organisiert, um eine technisch realisierbare Lösung möglichst zeitgerecht zu entwickeln. Für den Bau wurden verschiedene Optionen (DLR hausintern, aber auch externe Fertigung) geprüft. Schlussendlich wurde sich für eine hausinterne Fertigung bei FT entschieden. Der Prozess der Auslegung, Entwicklung und Fertigung des neuen Blattsatzes wurde bei der ursprünglichen Planung des Projektes zeitlich wie finanziell deutlich unterschätzt, so dass hieraus Verzögerungen entstanden, die eine Verschiebung des Windkanaltermins erforderlich machten. Finanziell wurde das Projekt durch DLR interne Mittel unterstützt.

Die Durchführung von Windkanalversuchen im DNW LLF ist gebunden an ein freies Zeitfenster an dem der Kanal und seine Mannschaft zur Verfügung stehen. Dies ist wiederum abhängig von der Auslastung des Kanals. Der DNW erfreut sich einer sehr guten Auslastung durch nationale und internationale Aufträge, so dass die Terminplanung relativ lange im Voraus durchgeführt und fixiert werden muss. Gerade bei Neuentwicklungen an denen viele verschiedene Partner beteiligt sind bestehen größere Unsicherheiten bzgl. der Zeitplanung (siehe z.B. Blattbau), so dass sich hier eine Zusicherung von fixen Terminen eher schwierig gestaltet. Kommt es dann zu Verzögerungen auf Kundenseite, kann der DNW in Ermangelung von ausreichend langen freien Zeitfenstern mitunter keine kurzfristigen Ausweichtermine anbieten, so dass auch kleine Verzögerungen dazu führen können, dass Windkanaltermine z.B. um 1 Jahr verschoben werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass auch ein Windkanal im Laufe der Jahre mal modernisiert oder aus anderen Gründen nicht zur Verfügung steht, was die Termin-Situation bei guter Nachfrage nach Kanalterminen nicht einfacher macht.

Schlussendlich ist die Verfügbarkeit des Rotorversuchsstandes im entsprechenden Versuchszeitraum und die notwendige Kompetenz zur Durchführung der Untersuchungen eine zwingende Voraussetzung. Letzteres ist durch die langjährige Erfahrung des DLR-FT auf den Gebieten der aktiven Rotorsteuerung, der Versuchstechnik und in der Planung und Durchführung von experimentellen Forschungsarbeiten mit Modellrotoren gegeben. Da die Versuchshardware und auch das Personal im Zeitrahmen des Vorhabens auch in weiteren Vorhaben eingeplant waren (NICETRIP, STAR) haben zeitliche Umplanungen durch Verzögerungen in den anderen genannten Projekten direkte Auswirkungen auf die Aktivitäten in FTK.

3 Planung und Ablauf

Bei der ursprünglichen Planung des Vorhabens wurde davon ausgegangen, dass die Windkanalversuche im DNW zum Ende des Jahres 2013 durchgeführt werden können. Verzögerungen im EU-Projekt NICETRIP und in der internationalen Kooperation STAR haben dazu geführt, dass beide Projekte statt in 2012 erst im Sommer/Herbst 2013 durchgeführt werden konnten. Die für diese Tests notwendigen Vorbereitungen und Vortests der jeweiligen Modelle in der Rotorhalle des DLR in Braunschweig belegten Versuchshardware, die folglich für Versuche im Rahmen von FTK-META-WK in der gleichen Zeit nicht zur Verfügung stand. Darüber hinaus banden die Vorbereitungen zu beiden Projekten einen Großteil des Rotorversuchsstands-Personals, so dass geplante Wartungs- und Erweiterungsarbeiten an der Mehrfachtaumelscheibe erst später als geplant begonnen werden konnten.

Ferner sind weitere Verzögerungen im Herstellungsprozess des modernen Modellrotorblattsatzes entstanden, der im Rahmen eines Unterauftrages von AHD beim DLR entwickelt und gebaut wurde und an dessen konstruktiver Auslegung und Bau mehrere Partner und Institutionen beteiligt waren (AHD, DLR-FT, DLR-FA, DLR-SHT). Die zeitlichen Verzögerungen konnten auch durch erheblichen

Mehreinsatz von Personal und Eigenmitteln (u.a. von der DLR-Programmatik) für die Jahre 2013 und 2014 sowie dem Einkauf von externer Beratungs- und Fertigungsleistung durch die Firmen beju-Technik und M&D-Flugzeugbau nicht vollständig kompensiert werden.

Bei einem externen Fertiger gemachte Erfahrungen bei der Herstellung eines Versuchsblattes haben das DLR-FT darüber hinaus zu der Überzeugung gebracht, dass die größtmögliche Beschleunigung des Blattbaus erzielt wird, wenn die Fertigung doch hausintern durch eigenes qualifiziertes Personal erfolgt, und zwar von dem Personal, das bereits bei der Entwicklung der Bauweise und der Herstellungsverfahren und bei der Herstellung des Versuchsblattes involviert war. Die eigentlich für die Aufgabe vorgesehene interne Zentralwerkstatt war leider nicht imstande eine akzeptable Zeitplanung zu angemessenen Kosten vorzulegen, so dass beschlossen wurde die Blätter direkt im Institut FT herzustellen.

Die Verzögerungen in diesem Unterauftrag hatten direkte Auswirkungen auf den Eigenantrag, da der Windkanalversuch inklusive des besagten Modellrotorblattsatzes gefordert und geplant war. Das hatte dazu geführt, dass der aufgrund der Verzögerungen in den Projekten NICETRIP und STAR zwischenzeitlich anvisierte Ausweichwindkanaltermin im Herbst 2014 ebenfalls nicht eingehalten werden konnte. Der einzig freie Termin der uns dann nach zusätzlichen Umbau- und Modernisierungsarbeiten beim DNW angeboten werden konnte, lag im September 2015 und damit deutlich außerhalb der ursprünglichen Projekt-Laufzeit (01/2012-03/2015).

Da für die Auswertung der WK-Versuche mind. 3 Monate erforderlich sind, wurde beim Projektträger ein mit dem Verbundführer abgestimmter und von ihm mitgetragener Antrag auf kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 9 Monate gestellt, mit einem neuen Projektende für das DLR am 31.12.2015. Diesem Antrag wurde vom Projektträger zugestimmt. Der Arbeits- und Zeitplan wurde entsprechend aktualisiert und ist in seiner finalen Version in Abbildung 3-1 dargestellt.

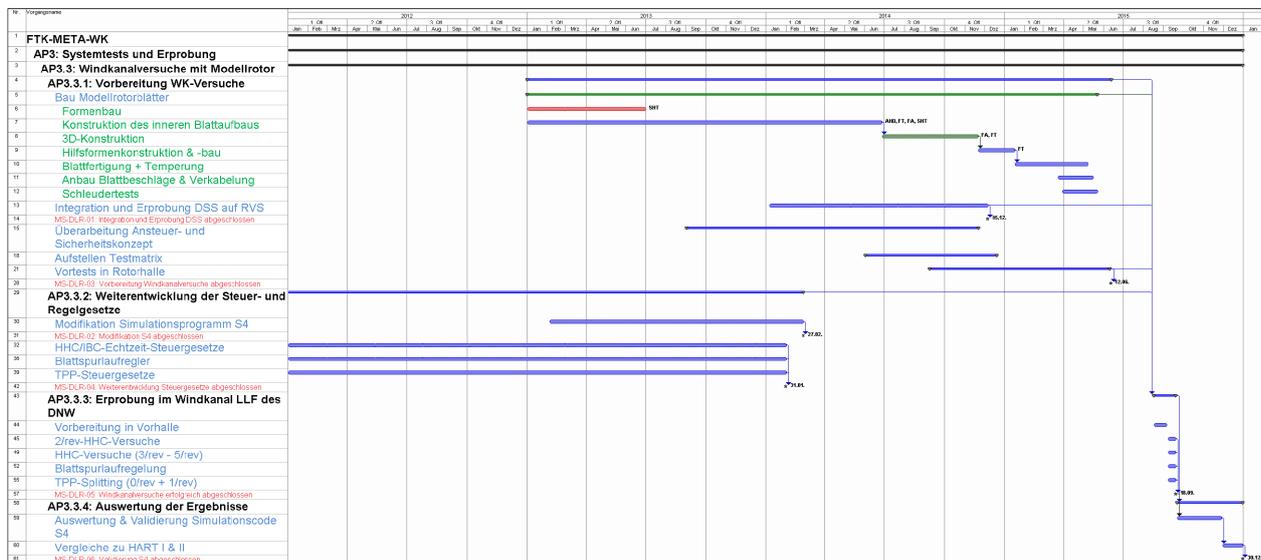


Abbildung 3-1: Zeitplan des DLR-Anteils im Projekt FTK-META-WK

In den definierten Arbeitspaketen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

AP3.3.1: Vorbereitung WK-Versuche

- Entwurf, Konstruktion, Bau und Test neuer moderner Modellrotorblätter
 - Festlegung des Blattfertigungsverfahrens
 - Festlegung der Sensorinstrumentierung
 - Iterative dynamischen Blattauslegung (FA – FT – AHD)
 - Bau eines Versuchsblattes zwecks Überprüfung der Herstellungsmethodik
 - Bau der Einzelkomponenten bei FT

- Zusammenbau der neuen Blätter bei FT
 - Überprüfung der Fertigungsqualität gemeinsam mit AHD (CT-Scans)
 - Einzelblattprobung der neuen FTK-Blätter im Schleuderturm
- Zerlegung, Inspektion, Wartung und Überarbeitung aller META-System-Komponenten
 - Entwicklung eines neuen, gewichtsreduzierten Kardanringes der äußeren Taumelscheibe sowie weiterer, gewichtsreduzierender Maßnahmen an Anbauteilen des Kardanringes
 - Wartungsarbeiten an Lagern und Taumelscheiben
 - Behebung von Vibrationsproblemen
 - Inspektion, Wartung und Revision aller dynamischer Komponenten
 - Überarbeitung der elektrohydraulischen Aktuatoren
 - Modifikation an den Taumelscheibenmitnehmerscheren
 - Justierung der Reglerelektronik und Kalibration von Aktuatorsonorik
 - Reparatur der Verkabelung der Elektromotoren der META
 - Identifikation der veränderten Dynamik der hydraulischen Aktuatoren
- Arbeiten am Rotorversuchsstand (RVS)
 - Modifikation des Rumpfmodells
 - Zusätzliche Saugpumpe
 - Filterüberwachung
 - Neues Heizsystem für Antriebsaggregat
 - Neue Spannungsversorgung der Aktuatorregelung
 - Überarbeitung der Verstärkerkarten/-boxen und der Schleifringplatine
 - Neue Blattkabel
 - Blattreparatur der Bo105-Modellrotorblätter
 - Modifikation des HMI zur elektrischen Primärsteuerung
 - Tausch der analogen in eine digitale Drehzahlregelung
 - Digitalisierung analoger Anzeigen
 - Neue Leistungsüberwachung des Hydraulikaggregats
 - Installation von Temperatursensoren zur Überwachung kritischer Stellen
 - Kalibrierung von Winkel-, Kraft- und Momentensensorik
 - Fertigstellung der Blattkabel
 - Entwicklung und Aufbau einer Blindleistungskompensation für das Hydraulikaggregat
- Anpassung des Mess- und Datenerfassungssystems
 - Überarbeitung der Signalverarbeitung im drehenden System
 - Integration einer Druckregelung für die Aktuatorhydraulik
 - Erweiterung des APS für das TEDAS2 Mess-System
 - Aufbau der Datenbasis für FTK-META-WK
 - Kalibrierung der einzelnen Sensoren und Messsysteme
 - Inklinometer-Kalibrierung
 - Erstellung neuer Auswertesoftware für Blatt-Drucksensor-Daten
 - Erstellung eines neuen TEDAS2-Konfigurationsprogramms
 - Erweiterung der Messsoftware für Überwachung der Taumelscheiben
 - Erweiterung der Messsoftware für Blattdrucksensorik
- Konzeption und Beschaffung von Dünnschichtsensortechnik zwecks Integration und Erprobung am RVS zur Überwachung von Steuerstangen- und Aktuatorlasten
 - Definition der Sensorschichtgeometrie
 - Übergabe der Geometriedaten und Rohteile (Sensorgrundkörper, Maskenformen) an das Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST)
 - Fertigung und Qualitätsprüfung der Sensorelemente durch IST
 - Konstruktion und Fertigung spezieller Druckbeilagscheiben und Kontaktklammern
 - Vermessung der Sensorelemente, Erstellung von T-R und F-R Kennlinien

- DSS Temperaturtests
- DSS Lasttests
- Test der DSS in einer alternativen Einbausituation
- Wiederholung der Erprobung der META in BS nach deren Wiederaufbau
- Erstellung einer mit AHD abgestimmten Testmatrix für DNW-WK-Versuche

AP3.3.2: Weiterentwicklung der Steuer- und Regelgesetze

- Entwicklung von Steuergesetzen für lokale Pitchwinkeländerungen
- Theoretische Überprüfung der Steuergesetze für lokale Pitchwinkeländerungen
- Modifikation der Ansteuerung der Aktuatorik für 3/rev-Steuer im drehenden System
- Erweiterung der META-Steuersoftware
 - Aufbau und Implementierung eines HHC-/Trackingreglers in dSPACE-Software
 - Test der entwickelten HHC- und Trackingregler am realen System

AP3.3.3: Erprobung im Windkanal LLF des DNW

- Abbau in BS, Transport zum und Wiederaufbau des RVS im DNW in Emmeloord
- Vorbereitung und Vortests in Vorhalle des DNW
- Durchführung der geplanten Experimente in der offenen Messstecke des DNW-LLF
- Abbau im DNW, Transport nach BS, Wiederaufbau des RVS in BS für nachträgliche Korrekturmessungen

AP3.3.4: Auswertung der Ergebnisse

- Sichtung des Datenmaterials und Datenkorrektur
- Auswertung der HHC/IBC-Versuche
- Auswertung TPP- und NHC-Versuche
- Auswertung der SPR-Messungen des DNW
- Auswertung der Lärmessungen des DNW
- Vergleiche zu HART I & II
- Validierung der Simulationssoftware S4

4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand

Seit den 1950er Jahren beschäftigt man sich mit dem Prinzip der höherharmonischen Rotorsteuerung (HHC). Während sich die Aktivitäten zu Beginn auf die Leistungseinsparung konzentrierten, waren in den 80er Jahren die Hauptziele anfangs die Vibrations- und später die Lärmreduktion. Da die Kinematik der Taumelscheibe zur Rotorsteuerung nur bestimmte Steuerfrequenzen im drehenden System zulässt (ganzzahlige Vielfache der Anzahl der Rotorblätter multipliziert mit der Rotordrehzahl Ω und die benachbarten Frequenzen $\pm \Omega$), ist die Möglichkeit, sämtliche HHC-Frequenzen im drehenden System anzusteuern, nur bei kleinen Hubschraubern mit maximal 3 Blättern gegeben. Bei Hubschraubern mittlerer Größe (z.B. H135, H145, MD900: 4-5 Blätter) und bei Großhubschraubern (z.B. CH-53: 6 bzw. 7 Blätter) ist z.B. eine 2/rev-Steuerung mit einer konventionellen Taumelscheibe wegen der kinematischen Beschränkung nicht möglich. Diese Einschränkung ist insofern relevant, da gerade diese Steuerfrequenz für eine Lärmreduktion besonders effektiv ist und auch für eine Vibrations- und Leistungsminimierung benötigt wird.

Um die Einschränkung der Steuerfrequenzbereiche zu überwinden, wurde in der Vergangenheit die aktive Steuerung der Rotorblätter in das drehende System verlagert, wo jedes Blatt eine eigene Steuerung erhält (IBC = Individual Blade Control). Dabei sind weltweit verschiedene IBC-Konzepte entwickelt und teilweise auf Prüfständen, im Windkanal aber auch im Flugversuch erprobt worden. Bei der herkömmlichen Blattwurzel-IBC werden die Steuerstangen im drehenden System durch hydraulische Aktuatoren ersetzt (z.B. Erprobungsträger Bo105-S1 von AHD). Bei der Klappensteuerungs-IBC (z.B. Programme LARS, INROS & VAR, Erprobungsträger BK117 & H145 von AHD) werden die Blätter mit Hilfe von Klappen an der Hinterkante kontrolliert, die z.B. über piezokeramische Aktuatoren elektrisch angesteuert werden. Bei der InHuS-Lösung (taumelscheibenlose Steuerung) wird sogar die gesamte Taumelscheibe durch elektrische Aktuatoren im Blattanschluss ersetzt. Noch fortschrittlicher aber zur Zeit noch weniger ausgereift sind Sekundär-Steuersysteme, die ohne mechanische Bauteile auskommen und die Blätter mit Hilfe von in die Blatthaut integrierten Piezofolien-Aktuatoren aktiv verwinden können (ATB, ACTOR, STAR).

Die gemeinsamen Arbeiten von DLR und Onera am Modellklappenrotor (ABC) haben gezeigt, dass sich die Aktuatorik zur Klappenansteuerung nicht einfach skalieren lässt. Sie ist in Modellgröße relativ betrachtet größer, schwerer und leistungsärmer als in Full-Scale-Maßstab. Auch bei InHuS wurde dieser Schluss gezogen, weshalb dieses Prinzip in erster Linie für Groß-, nicht aber für Mittel- und Kleinhubschrauber interessant und wirtschaftlich ist.

Das gemeinsame Problem aller IBC Steuerungen ist einerseits die Übertragung der hydraulischen und/oder elektrischen Energie und der notwendigen Signale ins drehende System und zurück und andererseits die Sicherstellung der Ausfallsicherheit. Außerdem sind ggf. zusätzliche Aufbauten auf dem Rotorkopf und/oder in die Blätter vonnöten, die eine deutliche Widerstandszunahme des Rotorkopfes bzw. eine aufwändige Modifikation der Rotorblätter mit sich bringen können.

Da sich die Taumelscheibe als bewährtes mechanisches System überall in der Hubschraubersteuerung durchgesetzt hat, ist es naheliegend, diese auch für das ganze Spektrum der IBC Steuerung zu verwenden. Basierend auf einer patentierten Erfindung des DLR wurde im Rahmen des LuFo-IV-Programms VAR für den DLR-eigenen Rotorversuchsstand die sogenannte Mehrfachtaumelscheibensteuerung (META) entwickelt, aufgebaut und in der Rotorhalle des DLR unter Schwebeflugbedingungen getestet. Mit der META ist eine individuelle Blattsteuerung von Mehrblattrotoren (>3 Blätter) möglich. Das META-Konzept zeichnet sich durch Aktuatoren im nicht drehenden System aus und lässt den Rotor ungeändert. Es eignet sich daher sehr gut für den Einsatz im vorhandenen Windkanalmodell. Da keine Energieübertragung ins drehende System erfolgt, wird zudem Gewicht gespart. Die Taumelscheiben werden über den Rumpf aerodynamisch verkleidet, so dass das System weitestgehend gegen äußere Einflüsse geschützt ist.

Aufgrund der baulichen Gegebenheiten ist bis heute weltweit kein einziger Machzahl skaliertes Modellrotorversuchsstand mit IBC-fähiger Rotorsteuerung ausgestattet, da hierfür bislang immer

Aktuatorik im drehenden Rotorsystem erforderlich war, wo der Platzbedarf für die Aktuatorik größer als der zur Verfügung stehende Bauraum ist und die Zentrifugallasten bei Machzahl skalierten Rotoren sehr hoch sind. Mit der Umrüstung des Rotorversuchsstandes steht dem DLR ein einzigartiges Werkzeug mit echter IBC-Fähigkeit zur Verfügung, was ein Alleinstellungsmerkmal auf dem Bereich der Modellversuchstechnik und damit eine herausragende Wettbewerbsposition in nationalen und internationalen Programmen bedeutet.

Auch international sind in der Vergangenheit teilweise mit großem Aufwand Full-Scale Windkanalversuche wie z.B. 2008 von Boeing (MD900 Klappenrotor z.B. zur Vibrationsreduktion) bei NASA/Ames durchgeführt worden. ZF Luftfahrttechnik hat gemeinsam mit Sikorsky in 2009 ebenfalls Full-Scale Windkanalversuche mit einer IBC-Blattwurzelsteuerung zu den Themen Vibrationen sowie Lärm-, Last- und Leistungsreduktion in Ames durchgeführt.

Das DLR arbeitet seit mehr als 25 Jahren auf allen Gebieten der aktiven Rotorsteuerung und kann daher eine langjährige Erfahrung bei der erfolgreichen Durchführung von Experimenten mit Modellrotoren im Windkanal mit nationalen und internationalen Partnern vorweisen, beginnend mit der höherharmonischen Blattsteuerung (HHC), später der individuellen Steuerung durch die Blattwurzel (IBC zusammen mit AHD und ZFL Kassel), der Klappensteuerung (IBC mit AHD und Onera), sowie der elektrischen Blattwurzelgesamtsteuerung (InHuS, INROS, zusammen mit ZFL Kassel und AHD).

Zwei der in der Vergangenheit vom DLR durchgeführten Versuche zur aktiven Rotorsteuerung (HART I und HART II) wurden 1996 und 2004 mit Preisen der Amerikanischen Hubschrauber Gesellschaft ausgezeichnet. Die im Jahr 2011 begonnene internationale Kooperation STAR mit den Partnern DLR, NASA/AFDD, Onera, DNW, JAXA, KARI und der Konkuk Universität führt diese Art der Zusammenarbeit im gleichen Sinne auf dem Gebiet der aktiven Blattverwindung fort.

Begleitend sind zu den meisten Windkanal-Versuchen numerische Modelle entwickelt worden, die mittels der Erkenntnisse aus den Tests kontinuierlich verbessert und in leistungsfähige Simulationsprogramme integriert wurden. Zur Berechnung von aerodynamischen, aeroakustischen und dynamischen Phänomenen steht das Rotorsimulationsprogramm S4 zur Verfügung, das isolierte Rotoren im stationären Betrieb untersucht.

Im direkten LuFo-IV-Vorläuferprogramm VAR wurde das META-System entwickelt, für den Rotorversuchsstand des DLR-FT aufgebaut und intensiv unter Schwebeflugbedingungen getestet [15]. Die Aufgabe des DLR im LuFo-IV-4-Nachfolgerprogramm Programm FTK war daher die Einsatzbereitmachung der Versuchshard- und -software für seine erste und zugleich erfolgreiche Erprobung im Windkanal.

5 Zusammenarbeit

Wie in der Vorhabenbeschreibung zum DLR Eigenantrag FTK-META-WK vermerkt, sind die hier beschriebenen Arbeiten des DLR integriert in das von AHD geführte Verbundvorhaben FTK. Daher bestand während der gesamten Projektlaufzeit eine enge Zusammenarbeit mit AHD. Für einzelne Entwicklungsarbeiten bei der Überarbeitung der Versuchshardware und einzelnen Baugruppen der META sowie bei den Entwicklungsarbeiten zum Blattbau gab es darüber hinaus eine DLR-interne Zusammenarbeit mit dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (DLR-FA) und dem Systemhaus Technik (SHT) in Braunschweig.

Darüber hinaus gab es weitere Zusammenarbeiten mit folgenden Firmen/Einrichtungen:

SBS-Sondermaschinen GmbH

- Fertigung der Sensorgrundkörper für Dünnschichtsensorik
- Fertigung von Maskierungskörpern zur Beschichtung der Sensorgrundkörper

FLP Microfinishing GmbH

- Polieren / Feinbearbeitung der Sensorgrundkörper vor dem Beschichtungsprozess

Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik

- Beschichtung der Sensorgrundkörper für Dünnschichtsensorik
- Charakterisierung der Sensorflächengeometrie
- Qualitätssicherung / Vortests der Sensorschicht

Lasercut24.de

- Fertigung und Nachbearbeitung von Kontaktbeilagscheiben für Dünnschichtsensoren

beju-Technik

- Durchführung von Entwicklungsarbeiten sowie Beratung im Bereich Modellrotorblattbau
- Durchführung von Entwicklungsarbeiten im Bereich Sensor-Instrumentierung

edm – Dreiling Maschinenbau GmbH

- Auslegung von Lamellenpaketen als Ersatz der im Rotorkopf verbauten Bendix-Knochen zur Aufnahme der Zentrifugallasten der Rotorblätter
- Fertigung von entsprechenden Lamellenpaketen

6 Erzielte Ergebnisse

Das Ziel in FTK-META-WK war die Erprobung der Mehrfachtaumelscheibe (META) des DLR im Windkanal LLF des DNW und damit der Nachweis der Wirksamkeit einer völlig individuellen Verstellung der Rotorblätter (IBC) mittels META unter verschiedenen simulierten Flugbedingungen. Dabei sollten insbesondere die Effektivität von Einzelblatt-Tracking (manuell und geregelt), Higher Harmonic Control (HHC), IBC und Tip Path Plane (TPP) – Splitting sowie lokal begrenzte Pitch-Winkeländerungen bezüglich Lärm, Vibrations- und Leistungsreduktion untersucht werden. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Blattsätze, zum einen ein 40% Machzahl-skaliertes Bo105 Blattsatz und zum anderen ein Satz neuer Modellrotorblätter, der in Zusammenarbeit mit AHD im Rahmen eines Unterauftrages durch das DLR ausgelegt, konstruiert und gefertigt wurde.

Im Beitrag des DLR zum Verbundvorhaben FTK standen am Beginn der Arbeiten die Überholung und Weiterentwicklung bzw. Revision der gesamten verwendeten Hardware der META zur Vorbereitung auf die geplanten Windkanalversuche. Parallel dazu erfolgen Entwurf und Bau des neuen Rotorblattsatzes sowie die Entwicklungsarbeiten zur Integration einer neuer Dünnschichtsensorik in das Windkanalmodell als Ersatz für herkömmliche Dehnungsmessstreifen zur Erfassung von Lasten im Steuerstrang.

In einer zweiten Phase wurden die bisher verwendeten Steuer- und Regelgesetze für die META sowie das bis dahin verwendete Sicherheitskonzept überarbeitet und erweitert. Dazu zählt die Umsetzung eines im Vorläuferprogramm VAR-META entwickelten echtzeitfähigen In-Flight-Tracking Reglers, der zu einem Vibrationsregler ausgebaut wurde. Darüber hinaus wurden neue Steuergesetze z.B. zur Verminderung von BVI-Lärm durch lokale Pitchwinkeländerungen entwickelt und getestet.

Nach Abstimmung des Testprogrammes mit AHD und Vortests in der Rotorhalle des DLR wurde die META schließlich im Rahmen einer Windkanalmesskampagne mit final 9 Messtagen im Niedergeschwindigkeits-Windkanal (LLF) des DNW in den Niederlanden erprobt. Die Ergebnisse dieser Versuche dienen der Validierung der DLR-eigenen Simulationscodes (z.B. S4) und fließen in die Entwicklung der Doppeltaumelscheibe (DTS) von AHD ein. Die Verwendung zweier verschiedener Blattsätze ermöglicht sowohl einen Vergleich zwischen modernen und älteren Rotorblattprofilen (Bo105 Rechteckblätter) als auch den Vergleich zu Messdaten anderer Forschungsprojekte wie HART / HART II und STAR.

Der nachfolgende Bericht beschreibt die wesentlichen Ergebnisse der projektbezogenen Arbeiten in der Gesamtlaufzeit zwischen dem 01.01.2012 und dem 31.12.2015.

6.1 Arbeitspaket AP3.3.1: Vorbereitung WK-Versuche

6.1.1 Entwurf, Konstruktion, Bau und Test neuer moderner Modellrotorblätter

Im Rahmen eines separaten Unterauftrages von AHD wurde das DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) beauftragt unterstützt durch AHD einen Modellrotorblattsatz für den Einsatz auf dem Rotorversuchsstand im DNW konstruktiv auslegen. Darüber hinaus war die ursprüngliche Planung, diesen Blattsatz im Nachfolgenden durch das Systemhaus Technik (SHT) fertigen zu lassen. Die Fertigungsschritte umfassen grob gegliedert die Konstruktion und den Bau einer Form, den Bau der Blattholme, der Blatthäute, der Schäume, die Modifikation vorhandener Blattanschlussbeschläge, die Integration von DMS-Sensorik sowie den Zusammenbau der fertigen Blattkomponenten.

Für die Fertigung des Modellrotorblattsatzes wurden Eigenmittel des DLR zur Verfügung gestellt. Das DLR-Institut für Flugsystemtechnik (FT) sollte Unterstützung bei der Festlegung der Fertigungsverfahren und der dynamischen Blattauslegung liefern. Aus verschiedensten Gründen wurde schließlich auch die Fertigung des Blattsatzes von SHT zu FT verlagert. Die Arbeiten wurden im gesamten Projektzeitraum durch AHD technisch beratend, prüfend und durch großzügige Material-

spenden unterstützt. Da diese Arbeiten im Rahmen eines Unterauftrages erledigt und dokumentiert wurden [16], wird an dieser Stelle auf eine nähere Darstellung verzichtet. Abbildung 6-1 zeigt den fertigen neuen Blattsatz (interne Bezeichnung: FTK-Blätter) vor deren Erprobung auf dem Rotorversuchsstand.



Abbildung 6-1: Fertiger FTK-Blattsatz

6.1.2 Instrumentierung und Tests der FTK-Blätter

Nach Abschluss der Fertigung der FTK-Blätter im Rahmen des Unterauftrages wurden die FTK-Blätter mit DMS-Sensorik im Blatthalsbereich bestückt, verkabelt, mit Steckern versehen und die Blattbeschläge montiert bevor sie auf dem Rotorturm des DLR-FT Einzel-Schleudertests unterworfen wurden. Erst danach erfolgten die Vortests auf dem Rotorversuchsstand.

6.1.2.1 Instrumentierung FTK-Blätter

Im Gegensatz zu den Bo105-Blättern wurden die FTK-Blätter nur mit DMS instrumentiert. Dabei sind die Sensorpositionen identisch mit denen der Bo105 Blätter (vgl. Abbildung 6-2). Es wurden 3 Vollbrücken in Schlagrichtung, 2 in Schwenkrichtung und eine Torsionsbrücke instrumentiert. Die beiden Torsions-DMS wurden bereits während des Blattbaus verkabelt und jeweils auf die Innenseite der beiden Häute geklebt, bevor das Blatt geschlossen wurde.

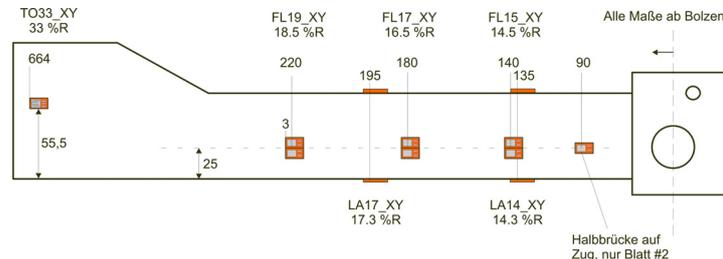


Abbildung 6-2: DMS-Positionen der Bo105- & FTK-Modellrotorblätter

Die FTK-Blätter erhielten die gleichen Stecker mit identischen Pinbelegungen wie die Bo105-Blätter (mit Ausnahme der fehlenden Kulite-Drucksensoren), damit für beide Blattsätze die gleichen Blattkabel verwendet werden können. Die DMS-Standard-Sensorik dient der Lastüberwachung der Blätter. Abbildung 6-3 zeigt die Ober- und Unterseite des fertig instrumentierten FTK-Blattes Nr. 1 inklusive Blattbeschlag und Stecker.

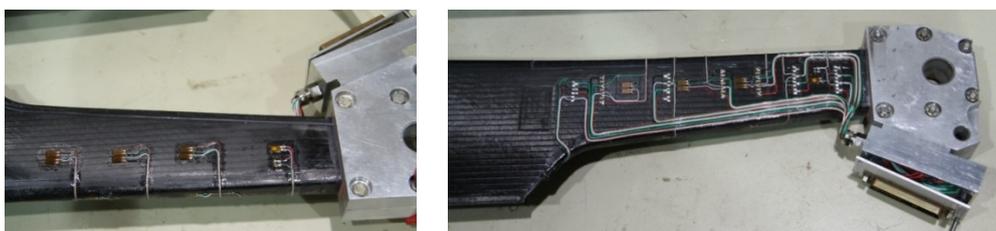


Abbildung 6-3: DMS-Instrumentierung von FTK-Blatt Nr. 1

Die Messwerte der DMS werden während der Versuche kontinuierlich am Piloten-Display angezeigt und bei Bedarf aufgezeichnet. Vor dem Ersteinsatz auf dem RVS mussten die FTK-Blätter jedoch einer Belastungsprobe im Einzeltest unterzogen werden.

6.1.2.2 Einzeltest FTK-Blätter

Jedes hergestellte FTK-Rotorblatt wurde einzeln einem speziellen Schleudertest unterzogen. Für diesen Zweck steht beim DLR-FT ein Rotorturm zur Verfügung, in dem einzelne Blätter montiert werden können (Abbildung 6-4). Der Teststand verfügt über ein verstellbares Gegengewicht zum Ausgleich der Blattmasse, sowie über eine Telemetrieanlage zur Übertragung von Messdaten vom drehenden ins stehende System. Da der Teststand zum Zeitpunkt der FTK Schleudertests auf einen rechtsdrehenden Rotor ausgelegt war, wurden die FTK-Blätter der Einfachheit halber ebenfalls rechtsdrehend betrieben, was bedeutet, dass die Profilerseite nach unten zeigt und der entstehende Rotorschub nach unten gerichtet war. Der Blattanstellwinkel wurde auf $1,5^\circ$ fix eingestellt, was einem Schub von etwa 200 N bei Nenndrehzahl entspricht.



Abbildung 6-4: FTK-Blatt Nr.1 auf dem Schleuderturm des DLR-FT

Vor Beginn jedes Schleudertests wurde jedes einzelne Rotorblatt kalibriert und die Messdatenkanäle entsprechend angepasst. Danach folgte der Auswuchtvorgang über die verstellbare Gegenmasse, um zu hohe Lasten, die durch Unwucht entstehen können zu vermeiden.

Das Messprogramm eines Schleudertests bestand aus Drehzahlvariationen bis zur Nenndrehzahl (1050 U/min) sowie das Einstellen einer Überdrehzahl von 115% (1200 U/min) zum Nachweis der Festigkeit auch über der nominellen Drehzahl hinaus. Da das dynamische System im Rotorturm nicht über eine Taumelscheibe verfügt und somit keine dynamischen Lasten eingeleitet werden können, wurde ein zusätzlicher Lüfter schräg unterhalb des Rotors installiert (Abbildung 6-4). Dieser diente dem Aufbringen von dynamischen Komponenten in der Strömung.

Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse der statischen (links) und dynamischen Blattbiege- und Torsionsmomente (rechts). Bei den Einzel-Schleudertests wurden keine Probleme festgestellt. Sämtliche Sensoren arbeiteten einwandfrei. Die Blätter waren somit einsatzbereit zur Montage auf dem RVS.

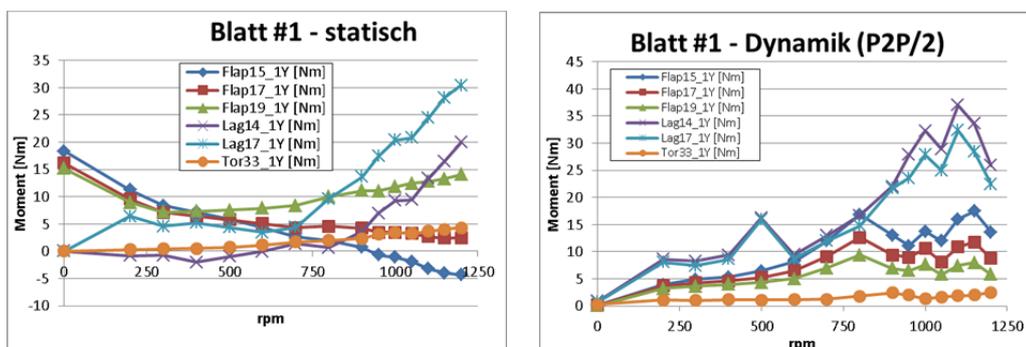


Abbildung 6-5: Statische und dynamische Blattbiege- und Torsionsmomente von Blatt Nr. 1 über der Rotordrehzahl

6.1.3 Zerlegung, Inspektion, Wartung und Überarbeitung aller META-System-Komponenten

Im Rahmen der Vorbereitungen des Modells für die Windkanalversuche waren diverse Änderungen und Verbesserungen der Hardware geplant. Am Anfang stand dabei die komplette Zerlegung und Inspektion des gesamten mechanischen Systems nach der intensiven Erprobung im Vorläuferprogramm. Zusätzlich war vorgesehen, sämtliche Teile des dynamischen Systems (oberhalb der Aktuatorfüße) einer Gewichtsanalyse zu unterziehen und ggf. Teile zu modifizieren oder neu zu fertigen, um so die insgesamt bewegte Masse und somit die auftretenden Trägheitskräfte zu reduzieren.

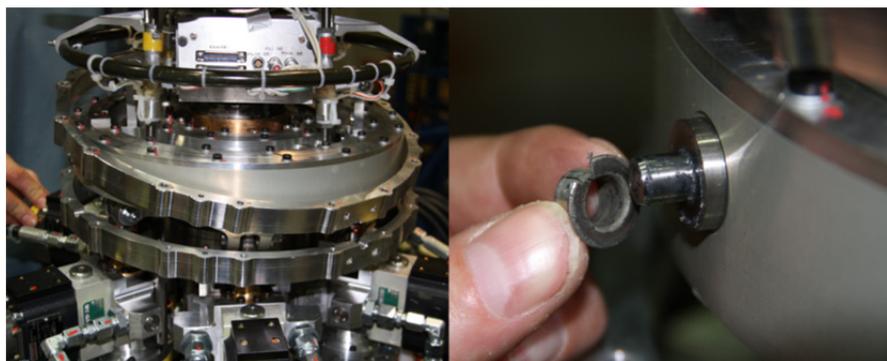
6.1.3.1 Äußere Taumelscheibe

Da in den durchgeführten Tests in der Rotorhalle des DLR z.T. sehr hohe mechanische Lasten auf Grund hoher Massenträgheiten und hochfrequente Vibrationsphänomene sowie thermische Belastungen an den Taumelscheiben aufgetreten waren, mussten die entsprechenden Systeme zunächst vollständig zerlegt und inspiziert werden. Im Vordergrund stand hierbei die Prüfung und Wartung (Reinigung, Schmierung, etc.) aller eingebauten Kugel-, Kegel- und Nadellager (Beispiel s. [Abbildung 6-6](#)) und gegebenenfalls der Austausch dieser Bauteile. Des Weiteren dienten diese Zerlegearbeiten der Erstellung eindeutiger Arbeitsanweisungen, beispielsweise zum Austausch des Hauptlagers der Taumelscheiben, für den späteren Einsatz des Modells im Windkanal.



[Abbildung 6-6](#): Lager der äußeren Taumelscheibenaufhängung

Bei der Zerlegung des äußeren Taumelringes, welcher für die kardananische Aufhängung der äußeren Taumelscheibe zuständig ist – stellte sich heraus, dass die Gleitlagerbuchsen zwischen äußerer Taumelscheibe und Kardanring den hohen Belastungen der ersten Tests offenbar nicht standgehalten hatten und beschädigt waren, siehe [Abbildung 6-7](#).



[Abbildung 6-7](#): Geteilter äußerer Kardanring und defekte Gleitlagerbuchse

Gründe für die mechanische Überlastung dieser Bauteile sind zum einen die (unvorhergesehenen) hochfrequenten Vibrationsphänomene, zum Anderen die hohen Massen im dynamischen System, die bei hohen Frequenzen wesentlich größeren Belastungen durch die Trägheitskräfte ausgesetzt waren als vorher abgeschätzt.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, nicht nur die Gleitlagerbuchsen selbst größer zu dimensionieren und zu ersetzen, sondern aus Gründen der Gewichtsreduktion den gesamten äußeren Kardanring neu zu konstruieren und aus dem Verbundmaterial CFK zu fertigen. Durch diese Maßnah-

me sollte sich nach ersten Abschätzungen die Masse des Kardanrings um mehr als die Hälfte reduzieren lassen, ohne dass Einbußen bezüglich Steifigkeit oder Funktion hingenommen werden müssten.

6.1.3.2 Massenreduzierende Maßnahmen an der äußeren Taumelscheibe

Ein Großteil der während des Projektes VAR-META im HHC-Versuch gemessenen, z.T. sehr hohen Bauteillasten an der META ist auf die Trägheit der verhältnismäßig hohen bewegten Massen im System (2 Taumelscheiben, äußerer Kardanring, Kardanstützen, etc.) zurückzuführen.

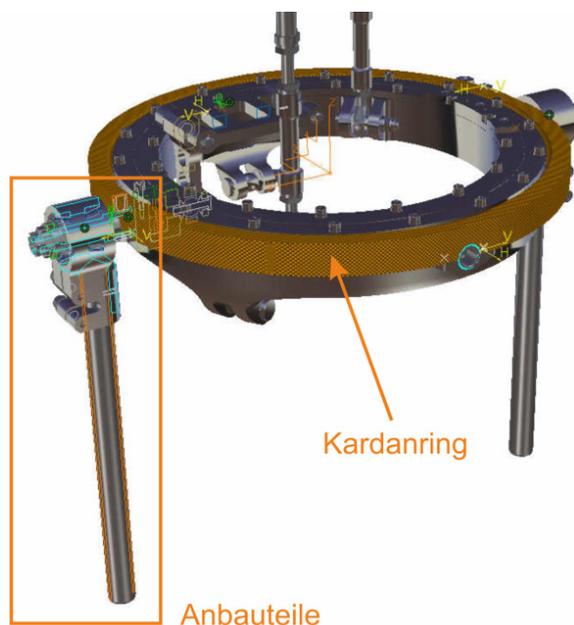


Abbildung 6-8: Zu modifizierende Teile an der äußeren Taumelscheibe der META

Um die Lasten in den geplanten Windkanalversuchen zu reduzieren und damit den Einsatzbereich sowie die Lebensdauer des Systems zu erweitern, sollte unter anderem der Kardanring, der zur vertikalen Positionierung und Lagerung der äußeren Taumelscheibe dient und aus massivem Aluminium bestand, durch einen neuen Kardanring mit gleicher Steifigkeit aber aus Kohlefaser-Verbundwerkstoff ersetzt werden (siehe [Abbildung 6-8](#)).

Darüber hinaus sollten diverse Anbauteile des Kardanringes – wie z.B. die vertikalen Stützrohre (siehe [Abbildung 6-8](#), links) – ohne Ihre Funktion einzuschränken in ihrer Masse reduziert werden. Dies kann, soweit festigkeitstechnisch zulässig, durch die Reduktion des jeweiligen Bauvolumens, der Wandstärke oder durch die Wahl eines anderen Materials gewährleistet werden. [Tabelle 6-1](#) zeigt eine Zusammenstellung der erreichten Massenreduktion der Einzelteile und des Gesamtsystems der äußeren Taumelscheibe.

Tabelle 6-1: Gemessene Massenreduktion der Bauteile der äußeren Taumelscheibe

Teile alt	Masse [g]	Teile / Material modifiziert	Gewicht [g]	Bemerkung
Kardanring (Aluminium)	1292	Faserverbund	149	
		Halter außen	10	für zwei Stück
		Halter innen	10	für zwei Stück
Stützen	666		362	für zwei Stück, aufgebohrt
Stützenhalter	302		282	für zwei Stück, abgefräst
Zapfen für Stützenhalter	238		150	für zwei Stück
		Kleinteile	40	
Gesamtmasse [g]	2498		1003	
Anteil Originalmasse	100%		40%	

Durch die vorgestellten Maßnahmen ergab sich eine Massenersparnis in allen genannten Teilen von knapp 60%, welche hauptsächlich auf das leichtere Baumaterial des Kardanringes zurückzuführen ist.

Abbildung 6-9 zeigt den neu konstruierten und gefertigten Kohlefaser-Kardanring der äußeren Taumelscheibe im Zusammenbau mit den Linearführungstützen und dem Lagerring. Im Zuge dieses Umbaus wurden gleichzeitig die zu erhöhtem Verschleiß neigenden äußeren Kardanringlager durch größere, solide, selbstschmierende Sinterbronze/Stahl-Lager ersetzt. Durch diese Maßnahme sinkt die Flächenpressung im Lager um etwa 85%.

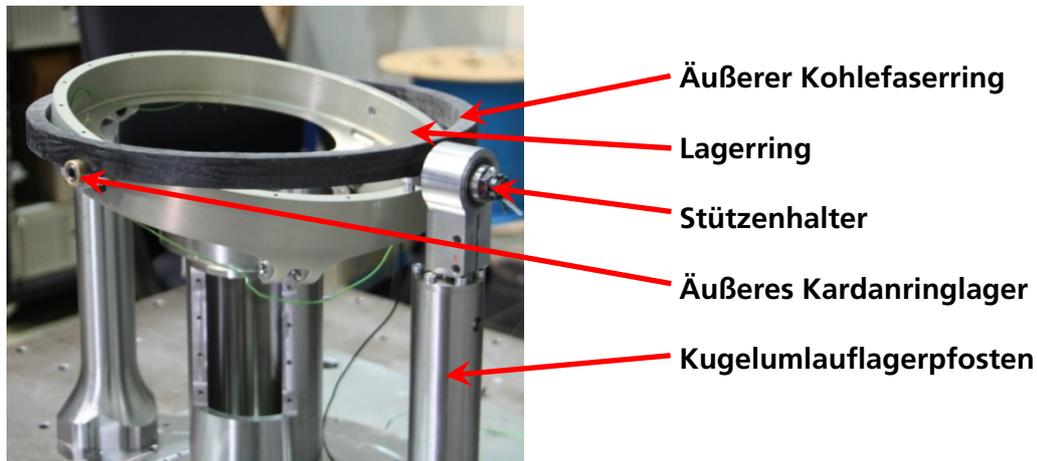


Abbildung 6-9: Modifizierende Teile an der äußeren Taumelscheibe der META

6.1.3.3 Modifikation des Lagersitzes an der inneren Taumelscheibe

Im Zuge der Revision der Komponenten der META wurden die Taumelscheiben zunächst komplett zerlegt und auf Sicht auf Beschädigungen überprüft. Besonderes Augenmerk galt dabei den Lagern und Führungen des Systems, da dort während des Betriebs zum Teil hohe Lasten aufgetreten waren.

Sowohl das Lager der inneren als auch das der äußeren Taumelscheibe mussten auf Grund von Beschädigungen ausgetauscht werden. Dabei rühren die Beschädigungen der Lager nicht ausschließlich von Belastungen während des Betriebs her, sondern konnten insbesondere im Fall der inneren Taumelscheibe auf einen fehlerhaften Lagersitz zurückgeführt werden (s. Abbildung 6-10).

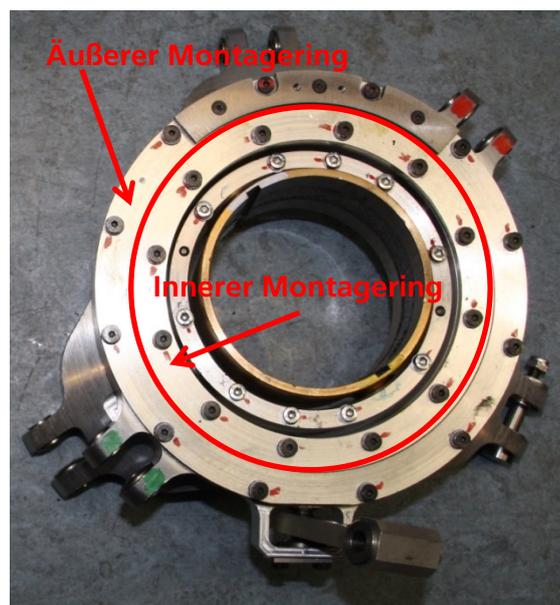
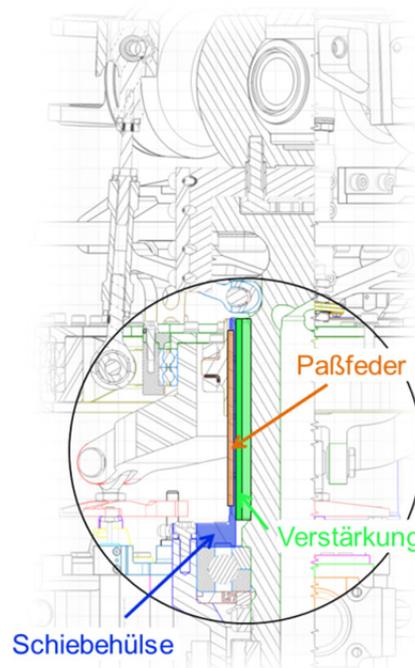


Abbildung 6-10: Innere Taumelscheibe ausgebaut

Der durch die beiden Montageringe auf das Lager ausgeübte axiale Druck verformte die Lagerringe über das zulässige Maß hinaus und führte damit im Betrieb zu schlechtem Lagerlauf und somit zu Beschädigungen des Lagers. Während der Vorversuche in der Rotorhalle im Rahmen des Vorläufer-Programms VAR-META zeigte sich dies z.B. in Form von stark erhöhten Temperaturen, die nur an der inneren Taumelscheibe aufgetreten waren. Im Zuge der Revision wurden die Montageringe mit Distanzscheiben versehen, um so in Zukunft die Axialkraft auf das Lager auf ein unkritisches Maß zu reduzieren.

6.1.3.4 Verstärkung der Passfeder der inneren Taumelscheibe

Auf Grund der zum Teil hohen Lasten während des HHC/IBC-Betriebes hatte die Passfeder, die als Verdrehungssicherung der Schiebehülse der inneren Taumelscheibe dient, die nur ca. 1 mm tiefe Tasche in der Schiebehülse nach und nach geweitet und wies somit erhöhtes mechanisches Spiel auf. Dies machte sich durch eine leichte Verdrehbarkeit des festen Teils der inneren Taumelscheibe sowie durch Geräuschentwicklung im Betrieb bemerkbar. Um weitere, durch mechanisches Spiel begünstigte Überbelastungen und Beschädigungen in Zukunft zu vermeiden, wurde die Schiebehülse mit einer weiteren innenliegenden Metallhülse verstärkt und die Passfeder in die nun verklebten Hülsen fest eingeschraubt (s. [Abbildung 6-11](#)).



[Abbildung 6-11](#): Verstärkung der Schiebehülse-Passfeder-Verbindung an der inneren TS

6.1.3.5 Arbeiten an den elektrohydraulischen Aktuatoren

Feststellung und Beseitigung der Ursache von Vibrationsproblemen

Zwecks Feststellung der Ursachen der durch die hydraulischen Aktuatoren verstärkten Resonanzphänomene wurde das Gesamtsystem in der Originalkonfiguration separat auf einem Montageblock aufgebaut und wieder in Betrieb genommen. Bei Tests mit unterschiedlichen Vorlaufdrücken (100 bis 200 bar) konnte das Resonanzphänomen durch eine geeignete Anregung gezielt angeregt, untersucht und die Ursache identifiziert werden.

Die Ursache wurde identifiziert als eine gegenseitige mechanische Anregung von Aktuatorkolben und Ventilsteuerkolben (s. [Abbildung 6-12](#)), welche eine identische mechanische Orientierung aufwiesen. Mit ausschlaggebend war hierbei auch die Permanentanregung des Ventilsteuerkolbens mit einer Frequenz von 400 Hz, die durch die ventilinterne Elektronik vorgegeben wird. Diese so genannte „Ditherfrequenz“ dient dazu, den Steuerkolben ständig in Bewegung zu halten, um so

Haftreibungseffekte beim Verfahren der Kolben aus einer Halteposition heraus zu eliminieren. Diese Bewegungen bzw. Vibrationen des Steuerkolbens übertrugen sich auf mechanischem Wege auf den Aktuator (wo der Ausschlag jedoch unterhalb des Messbereiches lag) und von dort auf das (innere) Taumelscheibensystem, welches auf Grund seiner Eigenfrequenz in der Nähe von 400 Hz angeregt werden konnte.

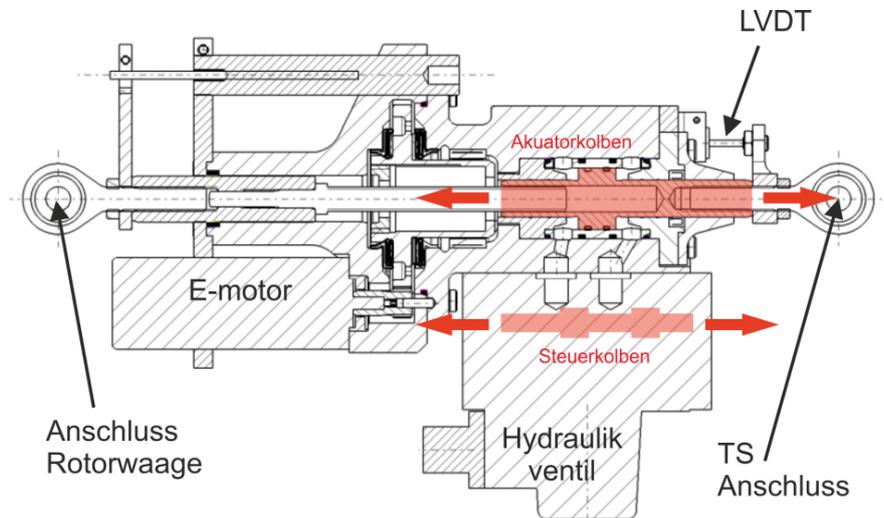


Abbildung 6-12: Lage und Bewegungsrichtung von Aktuator- und Ventilsteuerkolben, schematisch
Im Stillstand der Taumelscheiben führte dies lediglich zu einem erhöhten Geräuschpegel, im Betrieb konnte es jedoch unter bestimmten Bedingungen zu stark erhöhten Vibrationen und durch Aufschaukeln zu mechanischer Überbelastung des Gesamtsystems kommen.

Durch eine 90°-Verdrehung der Ventile gegenüber den Aktuatoren mit Hilfe speziell angefertigter Adapterblöcke (s. Abbildung 6-13) wurden die Oszillationsbewegungen der beiden Kolben mechanisch voneinander entkoppelt, was letztendlich zu einem deutlich ruhigeren Betrieb des META-Systems und zur Eliminierung des Vibrationsphänomens führte. Somit konnte durch die neu konstruierten Adapterblöcke eine geeignete Lösung zur Beseitigung des Resonanzproblems gefunden und zeitnah am System implementiert werden.



Abbildung 6-13: Aktuator mit Adapterblock (markiert) und Ventil

Auf Basis der zu erwartenden Maximallasten der Windkanalversuche wurde der dafür notwendige Hydraulikvordruck berechnet. Mit 150 bar sind alle im Betrieb zu erwartenden Lastzustände abgedeckt. Auch eine mögliche Drucksteigerung des Vorlaufdruckes wird als unkritisch betrachtet, da das modifizierte System auch bei 200 bar nicht mehr zur Resonanz angeregt werden konnte.

Inspektion, Wartung und Revision der Aktuatoren

Während des Betriebes der Mehrfachtaumelscheibe in der Rotorhalle des DLR-FT kam es - insbesondere bei längeren Betriebsdauern - zum verstärkten Austritt von Hydrauliköl am Kopf der elektrohydraulischen Aktuatoren. Im Versuch stellt ausgetretenes Öl zwar kein elektrisches Risiko dar (da nicht leitfähig) verschmutzt jedoch elektrische Kontakte, Stecker und Gerätschaften und kann bei Eindringen in Lager das zur Schmierung benötigte Fett auswaschen und mechanische Verbindungen (wie z.B.: Schraubverbindungen) beeinträchtigen. Darüber hinaus wurde an einigen Aktuatoren Öl aus dem Spindeltrieb auf Grund mangelnder Abdichtung entlang der Motorwelle in das Elektromotorengehäuse gepresst (siehe Markierungen in [Abbildung 6-14](#)). Diese Undichtigkeiten und die während der Tests aufgetretenen - teilweise stoßartigen - Belastungen erforderten auch für die Aktuatoren eine vollständige Inspektion und Überarbeitung.

Nach der Lösung der im Versuch wiederholt aufgetretenen Vibrationsproblematik wurden die Aktuatoren vollständig zerlegt und inspiziert, um die Ursache für den Ölaustritt zu finden. Neben Undichtigkeiten zwischen dem elektrischen und hydraulischen Teil des Aktuators wurde auch der Aktuatorkopf genauer untersucht.

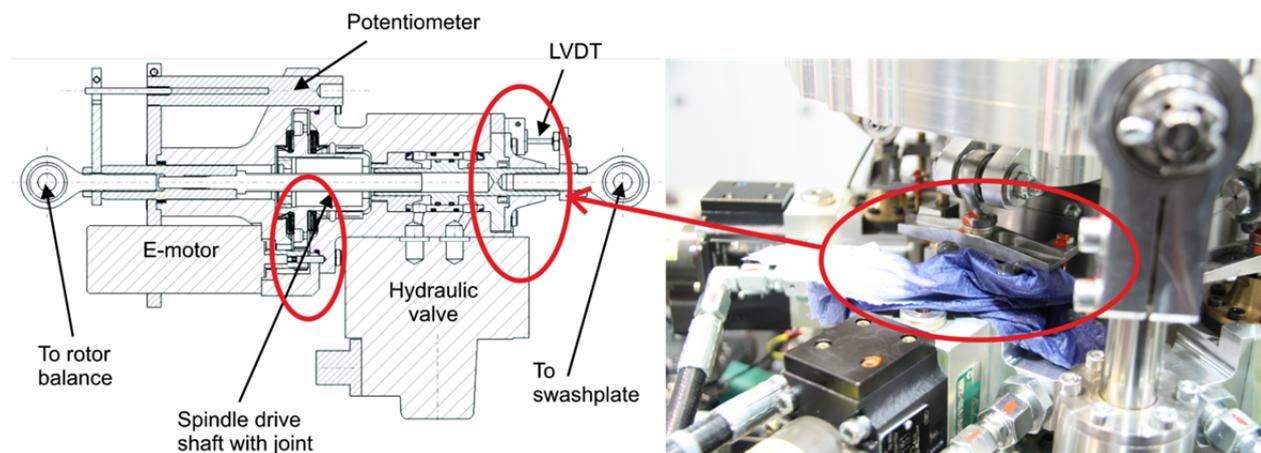


Abbildung 6-14: Undichtigkeiten an den Hydraulikaktuatoren

Dafür wurden die Aktuatoren – elektrischer und hydraulischer Teil – in Ihre Einzelteile zerlegt und überprüft. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Zerlegung und Reinigung der Einzelteile
- Sichtprüfung der Einzelteile, Feststellung von Ersatzteilbedarf
- Prüfung des Spindeltriebs auf Gleichlauf und Beschädigungen
- Beschaffung (ggf. Neufertigung) und Einbau der Ersatzteile
- Abdichtung und Zusammenbau der Aktuatoren
- Dichtigkeitstest und Inbetriebnahme

Die Undichtigkeit an der Welle des Elektromotors konnte durch eine Senkung in die Gehäusebohrung für den Ritzel-Passtift und die Einbringung eines entsprechenden O-Ringes behoben werden.

Ursache für die Undichtigkeiten am Aktuatorkopf war eine mitunter starke Schädigung der dort befindlichen Lauf- und Dichtflächen (s. [Abbildung 6-15](#)). Die Art und die Lage der Beschädigungen legte den Schluss nahe, dass es durch eine ungünstige Materialpaarung zwischen Aktuatorbrücke (Stahl) und Verdrehsicherungszapfen (Messing), sichtbar in [Abbildung 6-15](#) rechts und links oben, im Betrieb zur Blockierung der Gleitflächen und einer Verkipfung der Aktuatorbrücke und somit auch des Kolbens kam.

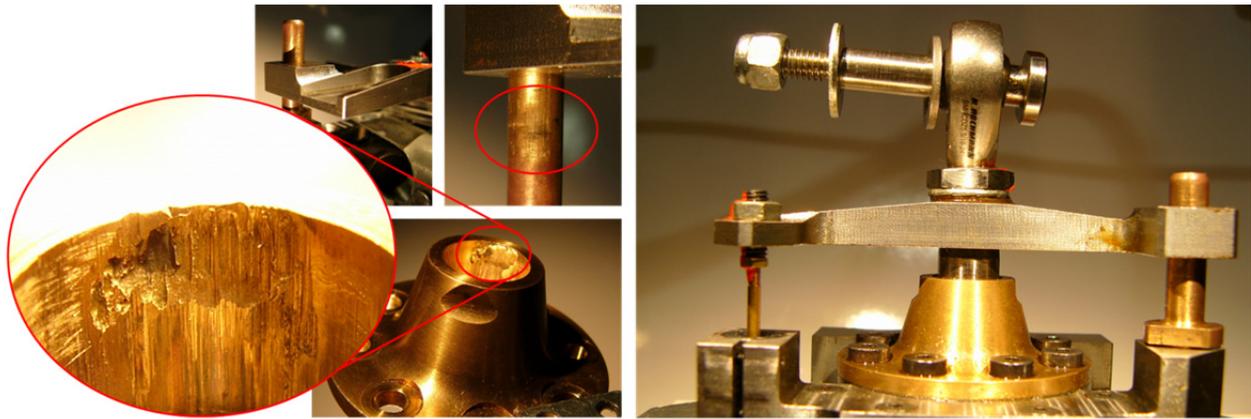


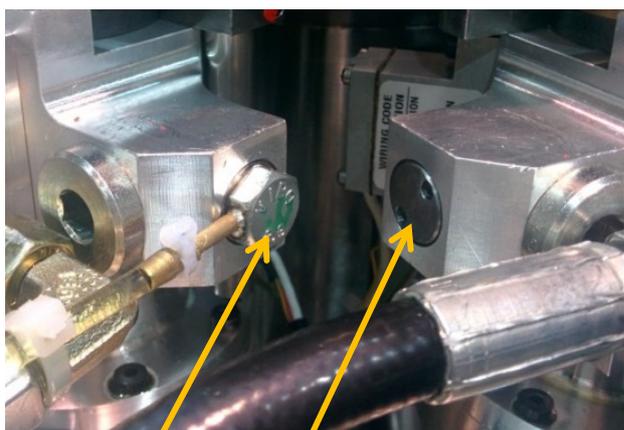
Abbildung 6-15: Schädigung der Lauf- und Dichtflächen am Aktuatorkopf

Diese Verkipfung des Kolbens verursachte in Kombination mit dessen Axialbewegungen die starken Beschädigungen im Inneren des Messingdeckels (Abbildung 6-15 ganz links) welche sich durch die Ansammlung von abgetragenem Material immer weiter verstärkten.

Zur Behebung des Schadens und zur Vermeidung dieser Vorgänge in Zukunft wurden sowohl der Messingdeckel als auch die Stahlbrücke aufgebohrt und mit entsprechenden Laufbuchsen versehen, die insbesondere in Kombination mit dem Material des jeweiligen Gegenstücks bessere Gleiteigenschaften aufweisen und so für einen deutlich reibungsärmeren Betrieb sorgen.

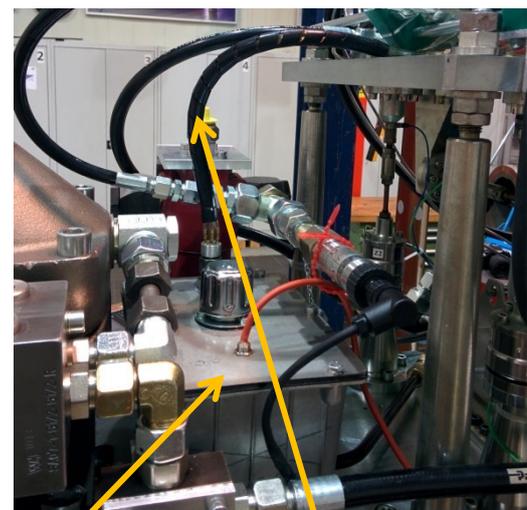
Als Hauptursache für die Ölproblematik konnte neben genereller Undichtigkeit festgestellt werden, dass sich das Rücklauf- und Lecköl des hydraulischen Aktuerteils u.a. wegen der sehr langen Leitungen zum Haupttank staut, dabei einen Überdruck aufbaut und deshalb das Öl folglich aus den dafür ungeeigneten Dichtungen im Leckölbereich herausdrückt. Um den Leckölrückfluss zu verbessern wurde als erste Maßnahme zur Abhilfe das Öl aus den Aktuatoren zu einem kleinen drucklosen Zwischentank abgeführt, der in der Nähe der Aktuatoren platziert wurde. Ein Füllstandsschalter im Zwischentank schaltet im aktivierten Zustand eine Absaugpumpe ein, die das Lecköl dann zum Haupttank befördert.

Wie in Abbildung 6-16 dargestellt, wurde der Blindstopfen der Rückleitung im Aktuator durch eine Schraube mit Bohrungen und einem eingelöteten Messingrohr ersetzt. Somit kann das Lecköl drucklos in den zuvor erwähnten Zusatztank fließen und abgepumpt werden (Abbildung 6-17).



Blindstopfen Druckseite

Schraube mit Messingrohr

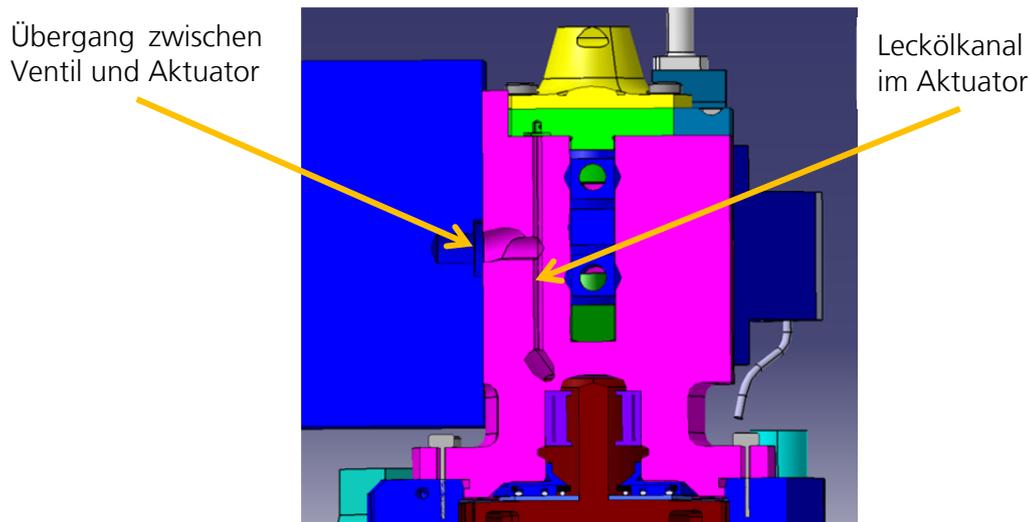


Lecköltank Gebündelte Leckölleitungen

Abbildung 6-16: Leckölabführung am Aktuator

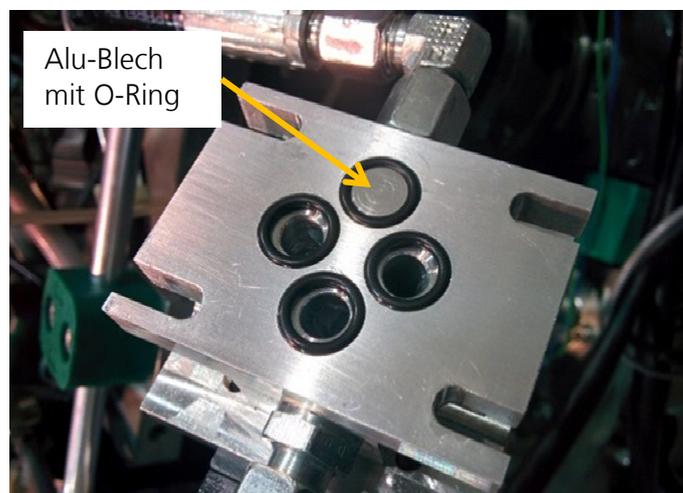
Abbildung 6-17: Lecköltank

Leider zeigte sich, dass sich das Leckageproblem an den Aktuatoren auch durch die zusätzliche Absaugung nicht vollends beheben ließ. Die Reduzierung des Gegendrucks in der Tankleitung durch die Verwendung eines Zwischentanks mit Absaugung hatte den Ölaustritt an den Aktuatoren zwar leicht reduziert, aber nicht völlig unterbunden. Durch intensive Sichtung der Konstruktionsunterlagen wurde eine Verbindung zwischen der Rückleitung des Ventils und der Leckölleitung des Aktuators als Ursache identifiziert. Da in der Rückleitung des Ventils ohne Absaugung und Zwischentank ein Druck von ca. 5 bar entsteht und dadurch das Öl in den Leckölkanal des Aktuators gedrückt wird kommt es fast zwangsläufig zum Ölaustritt an den Dichtungen der Kolbenstangen nach außen (siehe [Abbildung 6-18](#), hier ohne den gedrehten Zwischenblock). Dies ist ein Konstruktionsmangel, der offensichtlich auch schon bei den HHC-Aktuatoren von MBB vorhanden war, die bereits in den HART-Kampagnen eingesetzt wurden, und die den META-Aktuatoren als Konstruktionsvorlage dienen.



[Abbildung 6-18](#): Schnitt durch Ventiltrückleitung und Aktuator

Durch den Zwischentank wird die Rückleitung des Aktuators zwar drucklos, aber es ergeben sich immer noch unterschiedliche Durchflusswiderstände der Lecköl-Leitungen vor dem Übergang von Aktuator und Ventil, welcher hier als Summenpunkt fungiert. Zur Beseitigung des Problems mussten die Ventiltrückleitung und die Leckölleitung des Aktuators voneinander getrennt werden. Hierzu wurde der Übergang zwischen dem Ventil und dem Aktuator durch ein Aluminiumblech mit einem dichtenden O-Ring verschlossen ([Abbildung 6-19](#)). Dabei erwies sich die Tatsache von Vorteil, dass aufgrund der Vibrationsproblematik ein 90°-Adapterblock zwischen Aktuator und Ventil verbaut wurde, in dem diese Maßnahme einfach umzusetzen war.



[Abbildung 6-19](#): Zwischenblock mit Aluminiumblech

Die Leckölführung am Rotorstand wurde dann final auf die neue Funktion der Aktuatoren angepasst. Das Öl wird vom Aggregat durch die Vorlaufleitungen zu den Aktuatoren gefördert und steht dort mit dem nötigen Druck an der Betriebsseite des Servoventils an. Von der Ausgangsseite des Ventils fließt das Öl durch die Rückleitung, den Ölkühler und den Rücklauffilter wieder in den Haupttank. Hier bauen sich auf Grund des Filters weiterhin ca. 5bar Gegendruck auf, aber dies ist für das System unkritisch, da dieser Leitungsweg nun nicht mehr mit Leckstellen verbunden ist.

Die im Aktuator auftretenden Lecköle fließen nun schwerkraftbedingt in den Zwischentank und es treten keine Leckagen am Aktuator mehr auf. Der Zwischentank wird mit einem Schwimmerschalter überwacht, welcher bei Erreichen des etwa halben Füllstandes die Absaugung aktiviert, welche wiederum das Öl-Luft-Gemisch im Zwischentank über eine separate Leitung in den Haupttank abpumpt.

Neukalibrierung der META-Aktuatorik

Da die Aktuatoren komplett zerlegt und anschließend wieder zusammengesetzt wurden, wurde eine Neueinstellung bzw. Neukalibrierung der angebrachten Sensoren zur Messung der elektrischen und hydraulischen Verfahrswege sowie die Einstellung der analogen Notregler nötig. Folgende Aktionen wurden durchgeführt:

a) Einstellung der Reglerkarten

Jeder Steller besitzt eine eigene Reglerkarte, die genau auf den jeweiligen Steller abgestimmt ist. Somit sind sechs Reglerkarten in Betrieb, welche in der so bezeichneten Reglerbox eingebaut sind. Die einzelnen Reglerkarten werden über eine sogenannte Powerplatine mit Spannung versorgt. Neben der Energieversorgung übernimmt diese Platine außerdem die Umschaltung zwischen analoger und digitaler Regelung. Die Kolbenposition des hydraulischen Teils der Aktuatoren wird über einen LVDT (Linear Variable Differential Transformer) erfasst. Zur Notregelung der Mittellage wird eine Anpassschaltung benötigt (siehe [Abbildung 6-20](#)), um das LVDT-Signal als Istwert für den analogen Regler verarbeiten zu können. Die Einstellung erfolgt über zwei auf der Reglerplatine befindliche Trimpmpotentiometer. Zum einen muss der Peak-to-Peak-Wert des LVDT-Signals auf 8V (-4V bis +4V) angepasst werden, weiterhin muss bei der Mittellage des Aktuators 0V anliegen, was über das zweite Trimpmpotentiometer (R38) abzugleichen ist.

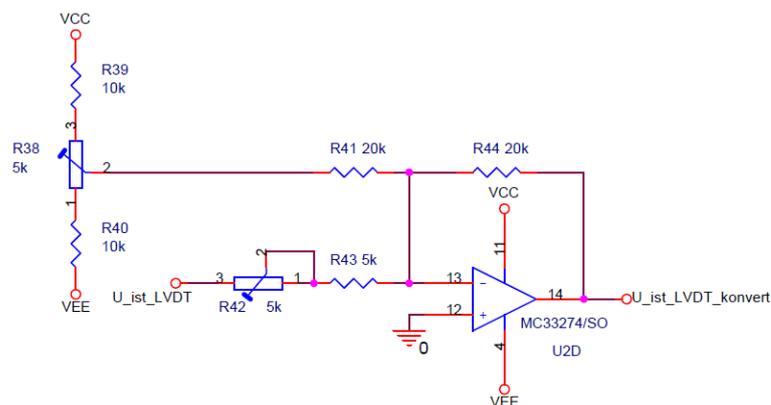


Abbildung 6-20: Konvertierungsschaltung

b) Längeneinstellung der Aktuatoren

Neben der Anpassung der Reglerkarten für die analoge Notregelung wurden alle Aktuatoren vermessen und die mechanische Gesamtlänge am hydraulischen Kolben eingestellt. Die digitale Regelung des META-Systems setzt eine genaue Kenntnis der aktuellen Stellerlängen voraus, um daraus weitere Regelgrößen bestimmen zu können. Daher ist es notwendig die Gesamtlänge der Steller zu kennen. In [Abbildung 6-10](#) sind die maßgebenden Längen eingetragen – bei allen Aktuatoren gleich ist der Festwert des Mittelstückes mit 160mm von Anschlagpunkt zu Anschlagpunkt. Von diesen beiden Punkten aus wird jeweils die Kolbenhöhe des hydraulischen und des elektrischen Teils gemessen. Die Längeneinstellung am Kugelkopf des hydraulischen Kolbens erfolgte in der Mittellage des elektrischen Teils.

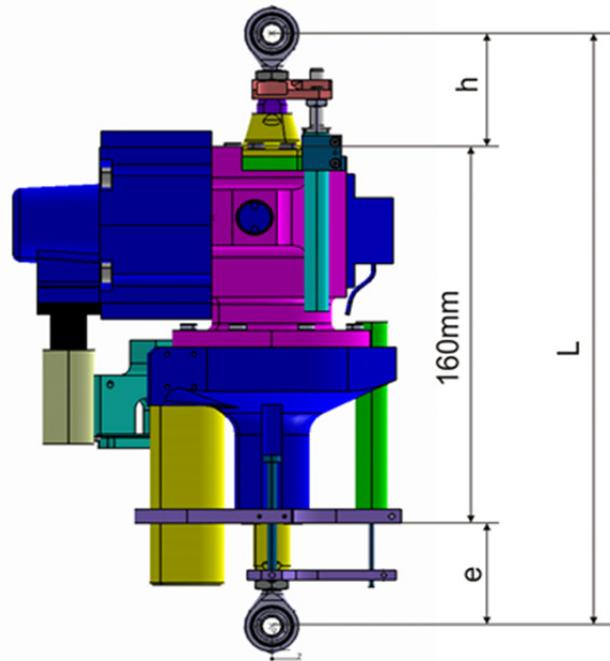


Abbildung 6-21: Stellerlängen

Am elektrischen Teil der Aktuatoren wurden alle Endlagenschalter geprüft und bei Bedarf neu eingestellt, um eine korrekte Referenzfahrt zu gewährleisten. Es wurde die Kolbenlänge bei oberem und unterem Endlagenschalter gemessen, daraus neue Home-Offsets ermittelt und diese Werte in die EPOS-Motorsteuermodule eingetragen. Nach dem Einschalten der EPOS-Motorsteuermodule müssen diese eine Referenzfahrt durchführen, um die Inkrementalgeber zu initialisieren. Beendet ein Steller die Referenzfahrt, so bewegt er sich auf die zuvor eingestellte Ruhelage – das Home-Offset. Weiterhin wurden die Potentiometer zur Längenmessung elektrischen Teils kalibriert.

Erneute Systemidentifikation der Aktuatorik

Durch die umfangreichen Wartungs- und Modifikationsarbeiten an den Aktuatoren – insbesondere an den Gleit- und Dichtflächen der Hydraulikkolben – wurden Passungen sowie mechanische Parameter wie Haft- und Gleitreibungskoeffizienten der Aktuatoren verändert. Besonders hervorzuheben sind hierbei auch die Modifikationen durch die Einführung der 90°-Adapterblöcke zwischen Ventil und Aktuator, sowie die Entkopplung von Rücklauf- und Leckölleitung.

Dieser Umstand machte einer erneute Systemidentifikation des hydraulischen Teils der Aktuatoren sowie eine entsprechende Anpassung der Echtzeitregelungsalgorithmen, insbesondere der Vorsteuerung, die auf einem invertierten Aktuatormodell basiert, notwendig.

Zu diesem Zweck wurden alle Aktuatoren unter einem Betriebsdruck von 150bar (Nenndruck) mit einem von 0,1Hz bis 300Hz ansteigenden Sinussignal mit 0,5 Volt Amplitude angesteuert. Um ein Erreichen der mechanischen Anschläge zu vermeiden, wurden die Frequenzsweeps im closed-loop Verfahren unter der Verwendung des bereits zuvor eingesetzten PID-Reglers (ohne Vorsteuerung) durchgeführt.

Die Sollsignale sowie die Reglersignale und die an den LVDTs gemessenen Spannungen wurden während der Frequenzsweeps mit Hilfe der dSPACE-Echtzeitsteuerungsanlage aufgezeichnet. Zusammen mit den Kenngrößen des eingesetzten PID-Reglers ist so eine Identifikation des dynamischen Systemverhaltens der Aktuatoren möglich.

Während der Aufzeichnungen zeigte Aktuator Nr. 3 (CH3, siehe [Abbildung 6-22](#)) zwischenzeitlich niederfrequente Abweichungen vom erwarteten Verhalten. Da diese Abweichungen jedoch in einem Bereich hoher Einsteuerfrequenzen (ca. 100Hz) auftraten, war eine Identifikation trotzdem möglich.

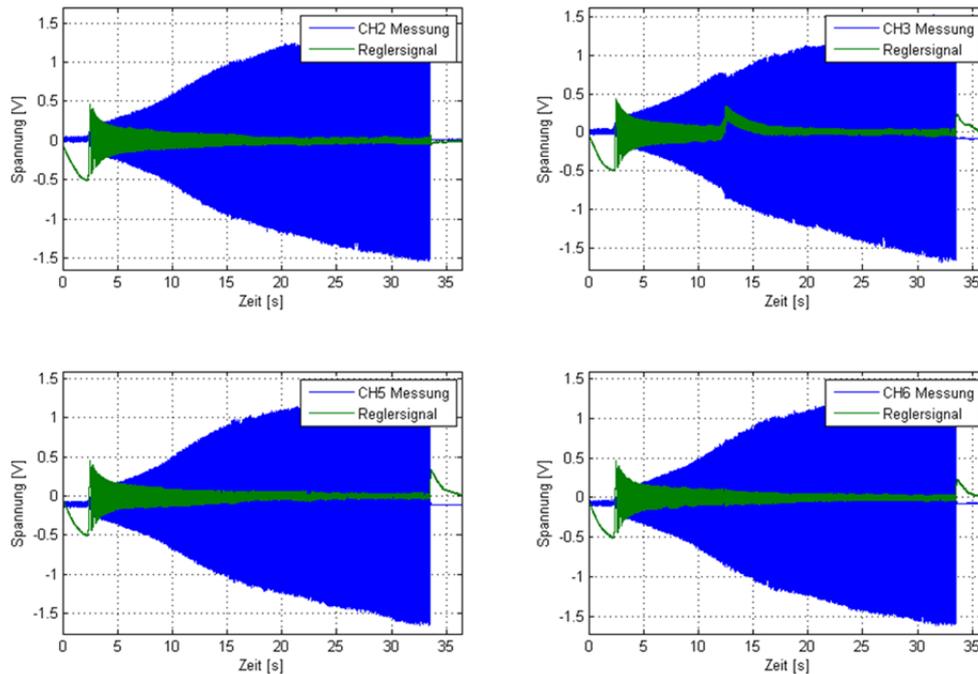


Abbildung 6-22: Auszug aus den Messreihen zur Systemidentifikation

Basierend auf den Erfahrungen aus dem LuFo-IV Vorgängerprojekt VAR-META wurden die jeweiligen Übertragungsverhalten F_n der Aktuatoren als Verzögerungsglied zweiter Ordnung in Kombination mit einem Totzeitglied (bedingt durch die LVDT-Sensorik) modelliert:

$$F_n = \frac{K_n}{a_{2,n} * s^2 + a_{1,n} * s} * e^{-s * T_{t,n}} \quad \text{mit } n = 1 \text{ bis } 6$$

Im Gegensatz zum Vorgehen in VAR-META, wo alle identifizierten Parameter mit Ausnahme der individuellen Verstärkungen K_n für die Modellierung und Regelung über alle Aktuatoren gemittelt worden waren, werden in FTK-META-WK alle Aktuatoren einzeln, d.h. mit den jeweils individuell identifizierten Parametern modelliert und entsprechend in der Vorsteuerung berücksichtigt. Ziel dieser Änderung ist ein weiterer Zugewinn an Regelungsgenauigkeit durch Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den einzelnen Aktuatoren bzw. ihres Systemverhaltens.

6.1.4 Arbeiten am Rotorversuchsstand (RVS)

6.1.4.1 Elektrische Primärsteuerung via Human Machine Interface HMI

Die Pilotierung des Rotorversuchsstandes im Steuercontainer erfolgt generell über ein HMI (Human Machine Interface). Mit Hilfe des HMI wird nur in die Basissteuerung des Modells (zyklische und kollektive Bewegung der Taumelscheiben) über den elektrischen Teil der Aktuatoren eingegriffen. Das besondere an der Steuerung des Modells über die Mehrfachaumelscheibe ist die Tatsache, dass beide Taumelscheiben in der Regel synchron angesteuert werden müssen, aber auch die Möglichkeit bestehen muss, separat gefahren zu werden. Hierfür wurde das Standard-HMI für Rotorversuche modifiziert. Um eine separate Steuerung der beiden Taumelscheiben zu gewährleisten, wurde ein neuer Drehschalter in das Gehäuse eingebaut und die Verdrahtung an die Hauptplatine des Mikrokontrollers vorgenommen. Es sind softwareseitig nun vier Steuermodi möglich:

- Common → Beide TS gleich
- Differential → Beide TS entgegengesetzt
- Inner → Nur innere TS
- Outer → Nur äußere TS

Des Weiteren wurde die aktuelle Steuermatrix der Taumelscheibe ermittelt und in das HMI-Programm implementiert sowie weitere Codeoptimierungen vorgenommen. Als weiteren Hard-

warebestandteil wurde ein neues Farbdisplay in das HMI eingebaut (siehe [Abbildung 6-23](#)), um dem Piloten noch schneller Rückmeldung über die aktuell eingesteuerten Winkel der elektrischen Steller Rückmeldung zu geben.



[Abbildung 6-23](#): 4D Systems Display

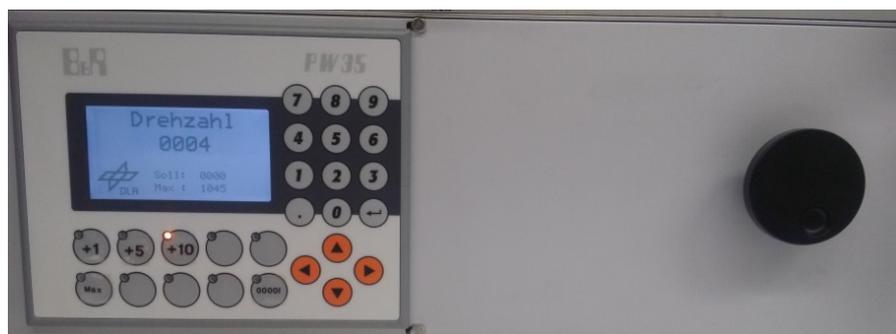
Die Anbindung an den Beck-IPC im HMI erfolgt mittels serieller Schnittstelle. Die entsprechende Verdrahtung von der Hauptplatine zum Display wurde vorgenommen. In der HMI-Software wurden neue Routinen zur Anzeige implementiert. Es werden die eingesteuerten Blattwinkel jeder Taumelscheibe sowie der aktuelle Steuer-Modus des HMI angezeigt (vgl. [Abbildung 6-24](#)).



[Abbildung 6-24](#): Erweitertes HMI

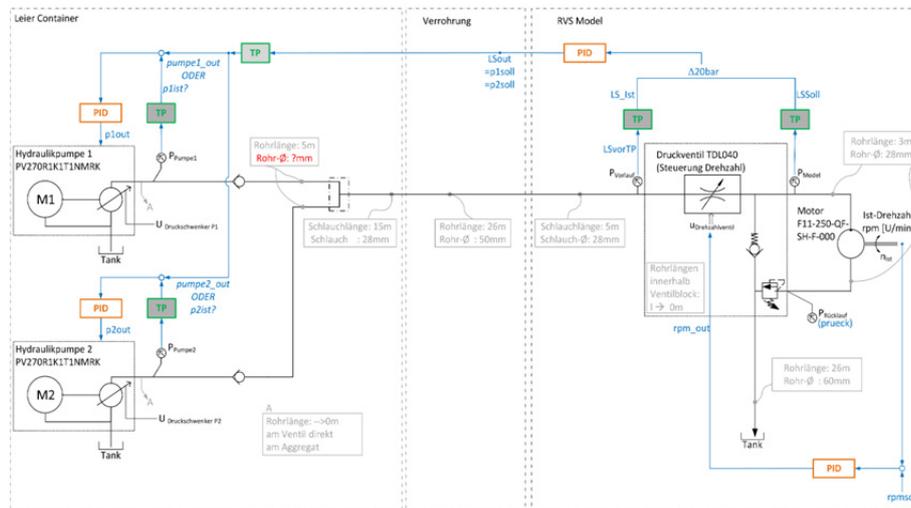
6.1.4.2 Digitale Drehzahlregelung

Das bisher im Rotorversuch verwendete analoge Potentiometer zur Einstellung der Rotordrehzahl des Hauptrotors wurde durch einen Drehimpulsgeber ersetzt (schwarzer Knopf rechts in [Abbildung 6-25](#)). Dieser wurde in das B&R System integriert, welches fortan die Drehzahlregelung übernimmt. Das zusätzliche, neuinstallierte B&R Modul PW35 (links im Bild) erleichtert die Eingabe der gewünschten Drehzahl. Hier werden nicht nur Informationen wie aktuelle Drehzahl und Soll-Drehzahl angezeigt, sondern es kann auch die maximale Drehzahl begrenzt und die Schrittweite pro Umdrehung des Drehimpulsgebers gewählt werden, sowie ein automatisches Herunterfahren der Drehzahl auf null ausgewählt werden.



[Abbildung 6-25](#): Steuerpanel zur Einstellung der Drehzahl

Die eigentliche Steuerung und Regelung der Drehzahl findet im B&R Power Panel (PP500) statt. Hier sorgen vier softwaremäßige PID-Regler für die Regelung. Die Parameter der einzelnen Regler wurden vor der Hardwareerprobung in Matlab/Simulink simuliert, berechnet und geprüft. [Abbildung 6-26](#) zeigt den Hydraulikkonzeptplan des Rotorversuchsstandes und wo die einzelnen PID-Regler eingesetzt werden.

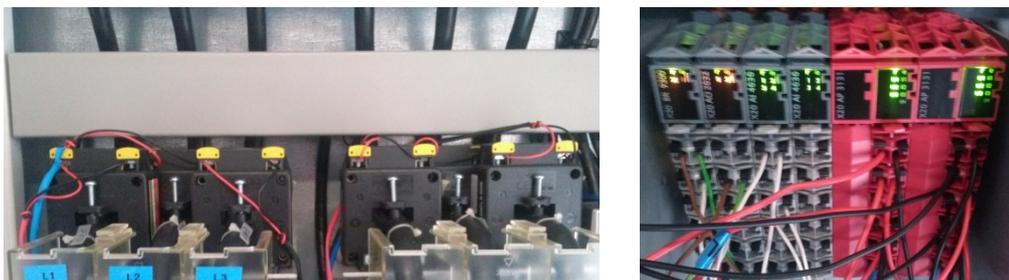


[Abbildung 6-26](#): Hydraulikkonzeptplan des Rotorversuchsstandes (Druckbereich: 30-350bar)

6.1.4.3 Leistungsmessung und Blindleistungskompensation der 190kW Hydraulikanlage

Das hydraulische Antriebssystem LeiEr für das FTK-META Windkanalmodell besteht aus einem elektro-hydraulischen Aggregat als hydraulische Pumpe und einem hydraulischen Motor im Modell. Das Aggregat selbst besteht nochmal aus zwei 160 kVA Elektromotoren, welche jeweils eine verstellbare Pumpe antreiben.

Damit der elektrische Verbrauch der 190 kW Hydraulikanlage überwacht werden kann, wurden entsprechende Stromzangen ([Abbildung 6-27](#), links) an den elektrischen Versorgungsleitungen angebracht. Mittels speziell für Strom- und Spannungsmessung ausgelegten B&R Komponenten (rechtes Bild) können dadurch die Wirk- und Scheinleistung, Blindleistung und der Leistungsfaktor (Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung bzw. „ $\cos \phi$ “) zeitgleich erfasst werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Blindleistung relativ hoch war, was vor dem WK-Einsatz auf jeden Fall noch kompensiert werden musste.



[Abbildung 6-27](#): Stromzangen und B&R-Komponenten zur Leistungsmessung der Hydraulikanlage

Für das Gesamtsystem gibt es ein zweistufiges Reglerkonzept, welches insgesamt 4 PID Regler miteinander kombiniert. Im inneren Regelkreis hält je ein PID Regler seine Pumpe auf dem vorgegebenen gemeinsamen Soll-druck, damit die Verluste im hydraulischen Koppelfeld, welches die Förderströme der beiden parallel betriebenen Pumpen zu einem gesamt Volumenstrom zusammenfasst, gering bleiben. Am Model wird der Volumenstrom proportional zur Drehzahl durch ein Drosselventil geregelt, da eine Regelung nur über den Pumpendruck nicht die nötige Genauigkeit in der nötigen Dynamik erreicht. Den äußeren Regelkreis bildet dazu ein PID-Lastregler, der den Pumpendruck proportional zu den Druckverhältnissen am Drosselventil regelt.

Nachdem der hydraulische Teil des Systems somit schon einen recht guten Wirkungsgrad erreicht hat, wurde zur weiteren Verbesserung des Wirkungsgrades auch der elektrische Teil des Systems optimiert. Elektrische Maschinen werden im Typenschild immer mit Ihren Kennwerten bei Volllast angegeben und hier erreichen die installierten Elektromotoren mit einem Wert $\cos \phi = 0,8$ bei 160 kVA Leistung auch Kennwerte eine Industriemaschine auf dem Stand der Technik.

Da die Motoren im vorliegenden Anwendungsfall aber oft im Teillastbetrieb genutzt werden, verhalten sich die Maschinen hier stärker induktiv und es tritt eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf. Der Kennwert „ $\cos \phi$ “ sinkt ab und die Maschine nimmt verstärkt Blindleistung auf, die nur im Netz hin und her geschoben wird.

Aus diesem Grund wurde ein System zur Blindleistungskompensation nachgerüstet ([Abbildung 6-28](#)), welches über eine adaptive Regelung die nötigen Kapazitäten in vier Stufen parallel zu den induktiven Motoren aufschaltet, um Strom und Spannung in Phase zu halten. Das Gesamtsystem erreicht so nun einen Leistungsfaktor von $\cos \phi = 0.95$, was dem Auslegungsziel für Industriemaschinen entspricht.

Die adaptive Regelung analysiert kontinuierlich die Betriebsspannung und Stromaufnahme der Antriebsmotoren und errechnet daraus die aktuell aufgewendete Wirk-, Blind- und Scheinleistung. Aus diesen aktuell gemessenen Leistungen wird dann über eine Entscheidungsmatrix mit Hysteresefunktion ermittelt, welche der vier möglichen Kompensationsstufen 10 kvar, 20 kvar, 30 kvar oder 40 kvar zugeschaltet wird. Aus der Kombination dieser vier Stufen ist eine Gesamtkompensationsleistung von 100 kvar möglich, welche in 10er Schritten angefahren werden kann.



Abbildung 6-28: Schaltschrank mit den Komponenten der Blindleistungskompensation

Die Status- und Warnsignale der Blindleistungskompensation wurden mit dem B&R Anlagensteuersystem verbunden und liegen so auch in der zentralen Anlageüberwachung vor.

Durch den Einbau des Systems konnten die Querschnitte der Anschlusskabel auf 120mm² reduziert werden, was die Nutzung vorhandener Multi-Contact Hochstromstecker ermöglicht. Dadurch wird das Handling der Anschlussleitungen stark verbessert. Die Verkabelung innerhalb des LeiEr Aggregats wurde komplett überarbeitet und ist nun in 185mm² Querschnitt ausgeführt.

Durch diese Überarbeitung und Verbesserung hat sich auch das (im Grunde schon hinreichend geringe) Störpotential des LeiEr System noch weiter verbessert. Vorher noch teilweise vorhandene 50Hz Brummeinstreuungen, die auch in den Wegsignalen der Aktuatoren zu sehen waren sind nun komplett verschwunden.

6.1.4.4 Installation Temperatursensoren

Um den Zustand der wichtigsten Bauteile des Gesamtsystems während des Betriebs überwachen zu können, ist auch eine Messung der Bauteiltemperaturen insbesondere der Lager erforderlich. Dazu wurden insgesamt 8 Messstellen mit Temperatursensoren ausgestattet (Abbildung 6-29). Neben der Motortemperatur werden die vier Lagerstellen der Zahnriemen-Kraftübertragung und die Temperatur der Rotormasthülse, welche ebenfalls zwei Kugellager enthält, überwacht. Außerdem sind an der inneren und äußeren Taumelscheibe je ein Sensor installiert. Bereits vorhanden war ein Messsystem auf Infrarotbasis, welches die Temperatur des Zahnriemens aufzeichnet.

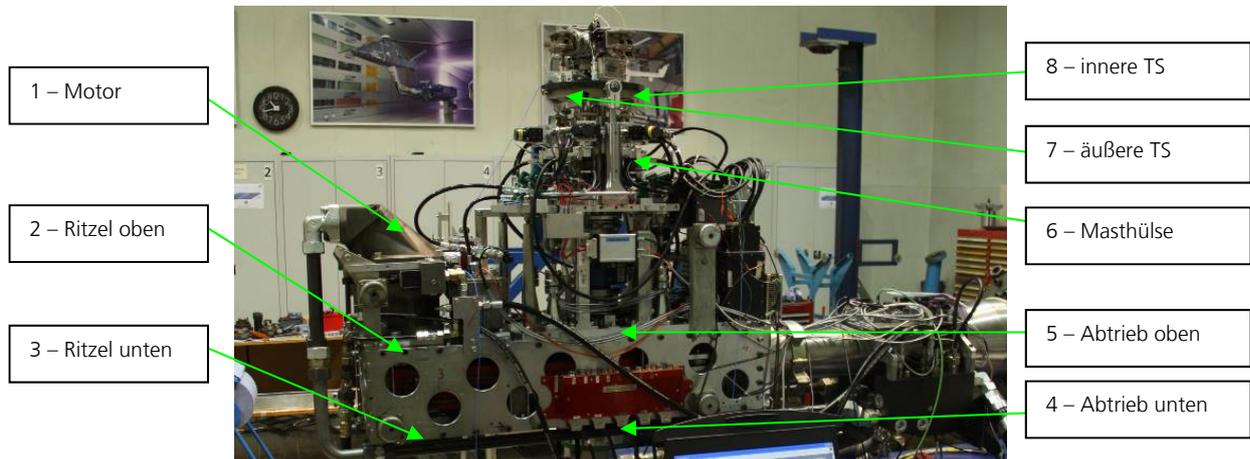


Abbildung 6-29: Position der Temperatursensoren

Die Temperatursensoren vom Typ PT 100 (Abbildung 6-30, links) sind über ein entsprechendes Modul mit dem B&R-System verbunden und werden von dort über den externen Datenserver (EDS) allen angeschlossenen Datenerfassungssystemen zur Verfügung gestellt. Sämtliche Informationen werden gesammelt im Pilotendisplay mittels Anzeige des Wertes und eines Farbindikators dargestellt (Abbildung 6-30, rechts). Je nach Temperaturwert ändert sich die Farbe des jeweiligen Indikators von grün (OK) über gelb (Grenzbereich) bis rot (Maximum überschritten).

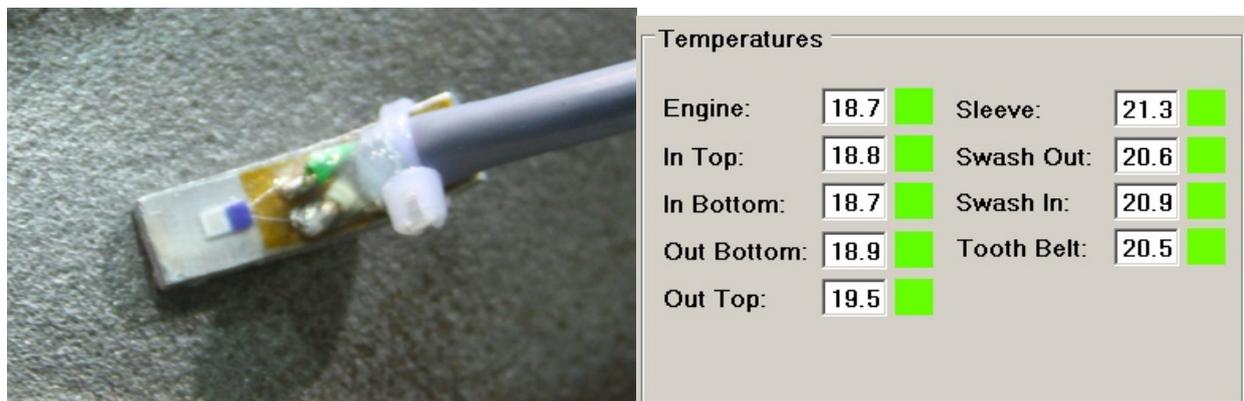


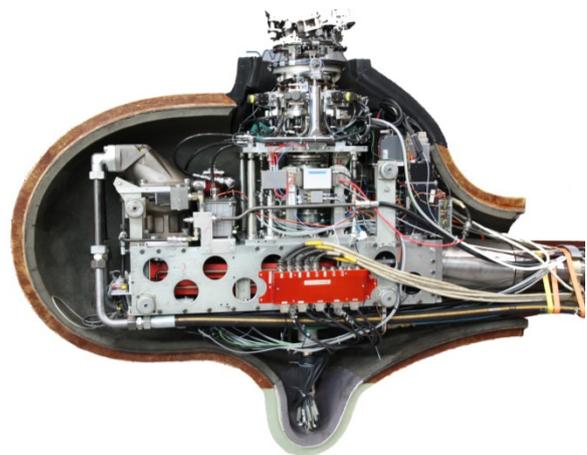
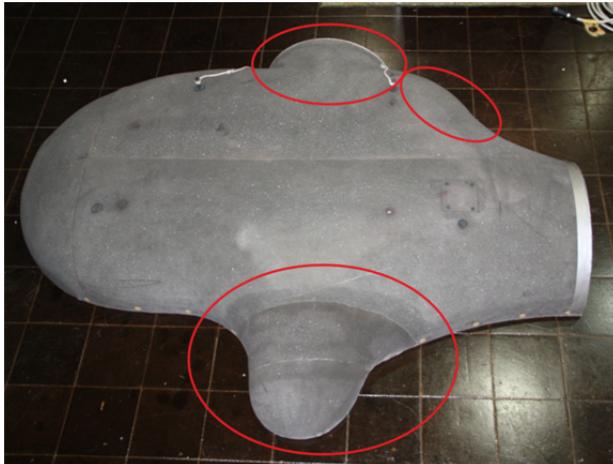
Abbildung 6-30: PT-100 Sensor (links), Temperaturanzeige im Display (rechts)

6.1.4.5 Rumpfverkleidung

Für die Windkanaluntersuchungen musste das META Windkanalmodell wegen der anstehenden Lärmversuche entsprechend akustisch verkleidet werden. Hierfür wurde eine bereits in früheren Windkanal-Versuchen (HART / HART II) verwendete Akustikverkleidung verwendet (s. Abbildung 6-31, links).

Durch den Aufbau der META und deren zugehörige Komponenten (wie z.B.: Reglerbox, EPOS-Module) und insbesondere die Vertikalführungen für den äußeren Taumelring haben sich die Abmessungen und die Geometrie des Windkanalmodells derart verändert, dass die Akustikverkleidung

in seiner bisherigen Form nicht mehr am Modell montierbar war und daher modifiziert werden musste. Dies betraf insbesondere den Ausschnitt für die Taumelscheiben sowie den Teil des Rumpfes direkt dahinter (Platz für Anbauten), und die untere Aufnahme für den Schleifringverteiler (s. Markierungen in [Abbildung 6-31](#), links).



[Abbildung 6-31](#): Halbschalen des ROTEST–Akustikrumpfes vor und nach der Modifikation

[Abbildung 6-31](#), zeigt rechts die Situation nach den Modifikationen im aufgebauten Zustand. Der Teil im oberen Bereich der Rumpfverkleidung wurde demontierbar gestaltet, was sich in den Versuchen im Windkanal als deutlicher Vorteil erwies, da es den Zugriff auf die wichtigsten Komponenten der META und der Waage wesentlich erleichterte. Vor der Modifikation mussten die kompletten Halbschalen entfernt werden, wenn Zugriff auf das Innenleben erforderlich war. Das war gerade im Hinblick auf die Masse pro Halbschale (ca. 82 kg) und die Zugänglichkeit zum Gesamtmodell in der Stecke per Hebebühne deutlich aufwändiger und dauerte auch entsprechend länger.

6.1.4.6 Arbeiten an der Hydraulikversorgung der Aktuatoren

Die Druckregelung des für die Versorgung der Aktuatorik benötigten Sauer Hydraulikaggregats wurde vollständig in das bestehende BR-System integriert. Neben der An- und Abschaltung und der Drucküberwachung des Hydraulikaggregats wurde auch der Zugriff auf die Regelung direkt in die Touchscreen-Oberfläche des B+R-Moduls integriert.

Des Weiteren wurde der Blasenspeicher des Saueraggregates umgerüstet (s. [Abbildung 6-32](#)), welcher nun ebenfalls über das BR System gesteuert wird. So kann der Blasenspeicher nach Abschaltung des Hydraulikaggregats gezielt und vom Steuercontainer aus drucklos geschaltet werden (das enthaltene Öl wird dabei über ein Magnetventil direkt in den Tank entlassen). Dies ist Bestandteil des Sicherheitssystems für den Betrieb der META, damit im Falle eines Ausfalls der Hydraulik im Windkanalbetrieb die Versorgung der Hydraulikaktuatoren nicht schlagartig drucklos und damit das Modell schlagartig unkontrollierbar wird.



[Abbildung 6-32](#): Neuer Blasenspeicher inkl. Sicherheits-Magnetventil an der Sauer-Hydraulikanlage

Filterüberwachung

Von essentieller Wichtigkeit für den verlässlichen Betrieb des hydraulischen Teils der META-Aktuatoren ist hinreichend partikelfreies Öl. Während der Vorversuche wurden drei $5\mu\text{m}$ Ölfeinfilter den Aktuatoren vorgestaltet. Bedingt durch den Umbau auf einen neuen leistungsstärkeren Antriebsmotor, haben sich die geometrischen Randbedingungen derart geändert, dass nun nur noch ein Filter zum Einsatz kommen wird. Da jetzt nur noch ein Drittel der Filterfähigkeit zur Verfügung steht, wird mit Hilfe eines neuen Verschmutzungssensors der Zustand des Filters überwacht und im Steuercontainer angezeigt.

Heizsystem für Antriebsaggregat

Da die Aktuatoren keinen so großen Leistungsumsatz machen, wie der Hydraulikmotor des Heckrotors, für den das Hydraulikaggregat eigentlich ausgelegt ist, besteht die Möglichkeit, dass das Öl nicht von selbst seine Betriebstemperatur erreicht, wenn das Aggregat im Windkanalbetrieb auf Grund seiner Lärmemissionen außerhalb der Messstrecke stehen muss. Aus diesem Grund wurde ein Heizsystem für das Öl im Tank des Aggregats entwickelt und installiert mit dem es möglich ist, das Öl im Tank auf eine Mindestbetriebstemperatur aufzuheizen. Das Heizsystem muss den hydraulischen Bedingungen genügen und sollte sich vernünftig in den bisherigen Aufbau des Aggregates einfügen. Ein reines Heizelement im Tank wäre keine gute Lösung gewesen, da sich bei tiefen Temperaturen und entsprechend zähem Öl keine Konvektion im Tank einstellen und das Öl an der Oberfläche des Heizelementes im Tank verkohlen würde.

Als Lösung wurde der bestehende zweite kleine Kühlkreislauf des Aggregats so verändert, dass er nun auch als Heizung verwendet werden kann. In diesen Kreislauf wurde ein freischaltbares Drosselventil eingebaut, welches das Öl bei Durchströmung aufheizt. Der Kühler ist in diesem Betriebszustand nicht aktiv.

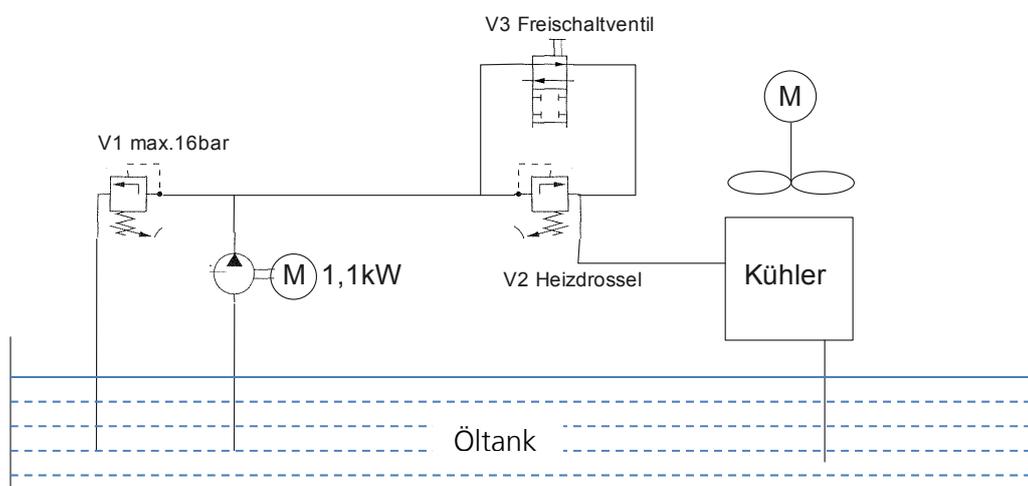
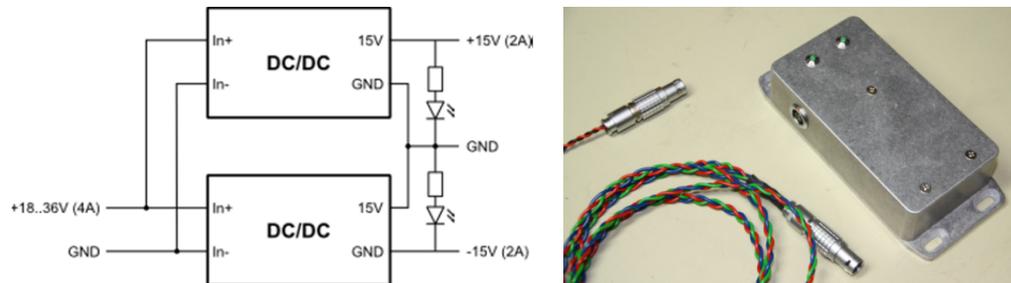


Abbildung 6-33: Prinzip der Ölvorheizung

6.1.4.7 Spannungsversorgung der Aktuatorregelung

Im Zuge der Vorbereitungen der META Versuche wurde als Notregelsystem ein Analogregler für die Aktuatoren entwickelt, der bei Ausfalls des dSPACE Regelsystems die Aktuatoren des hydraulischen Teils der META-Steller in Mittenpositionen bringen und dort halten soll. Diese Reglerbox, bestehend aus einer Hauptplatine und sechs Einsteckkarten mit jeweils einem Regler pro Aktuator, benötigt eine Eingangsspannung von $\pm 15\text{V}$, um den Betrieb der Fensterkomparatoren und Regelglieder betreiben zu können. Es wurde festgestellt, dass die bis dato verwendete Eingangsspannung aus der am Rotorversuchsstand befindlichen Sattelbox jedoch zu große Schwankungen aufwies und nicht die geforderte Genauigkeit der Eingangsspannung gewährleisten konnte.

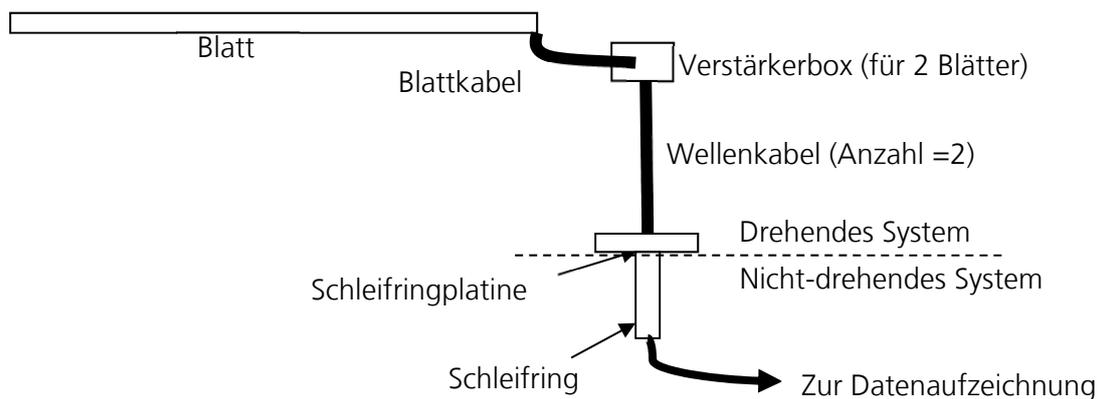
Da ausreichend genaue Spannungsquellen für diesen Anwendungsbereich käuflich nicht direkt zu erwerben waren, war es notwendig eine neue geregelte Spannungsquelle zu entwickeln, die den Anforderungen genügen würde. Nachdem die Stromaufnahme der Reglerbox anhand von Datenblättern der einzelnen Bauteile überschläglich ermittelt und bei einer abschließenden Messung auf ca. 1,2 A verifiziert wurde, konnte ein geeignetes Schaltungskonzept erstellt und entsprechend die dafür benötigten Bauteile dimensioniert, ausgewählt und anschließend die Spannungsquelle gebaut und in ein passendes Gehäuse verbaut werden (siehe [Abbildung 6-34](#)).



[Abbildung 6-34](#): Schaltplan Spannungsquelle, Gehäuse und Anschlusskabel

6.1.4.8 Verstärkerkarten/-boxen, Schleifringplatine und Blattkabel

Da im Windkanalversuch zwei unterschiedliche Blattsätze erprobt werden, die im Vergleich zur Rotorhallen-Erprobung im Rahmen von VAR-META deutlich umfangreicher instrumentiert sind, war eine Überarbeitung der Signalpfade und deren technische Umsetzung erforderlich. [Abbildung 6-35](#) zeigt den Signalpfad der Blattinstrumentierung in das nicht-drehende System.



[Abbildung 6-35](#) – Signalpfad vom drehenden in das nicht-drehende System

Die Modifikationen machten auch Änderungen an den Blattkabeln und den Verstärkerboxen erforderlich. Die neuen Leiterplatten der Verstärkerboxen wurden geroutet und bestückt, bevor die Verstärkerboxen mechanisch zusammengebaut und somit einsatzbereit gemacht wurden. [Abbildung 6-36](#) zeigt beispielhaft die Verstärkerbox für die Blätter Gelb (1) und Grün (2) und die einzelnen inneren Komponenten.



[Abbildung 6-36](#): Verstärkerbox (links), Adapterplatine (o. rechts) und Verstärkerkarte (u. rechts)

Genau wie die Verstärkerboxen, musste auch die Schleifringplatte durch die erhöhte Anzahl von Blattsensoren zu den bisherigen Vorversuchen angepasst werden. Die Schleifringplatte wurde neu geroutet, hergestellt und bestückt. Abbildung 6-37 zeigt den Schleifring mit der Schleifringplatte und den vom Schleifring kommenden Anschlusskabeln. Die zwei offenen Steckkontakte im Bild (a+b) sind für den Anschluss der Wellenkabel vorgesehen.



Abbildung 6-37: Schleifring & -platte mit Wellenkabelanschlüssen (a+b)

Für die WK-Versuche mussten neue Blattkabel (Verbindung der Blätter zu den Verstärkerboxen) gefertigt werden. Die exakte Länge der Blattkabel ist erst nach Montage aller Anbauteile an den Rotorkopf bekannt, so dass deren Fertigstellung eine der letzten Arbeiten am Signalpfad darstellen. Da die Kabel im Betrieb hohen mechanischen Belastungen (dynamische Pitchbewegung der Blätter plus Zentrifugallasten) ausgesetzt sind, wurden alle Blattkabel nach einem von der Kabelanzahl abhängigen Schema verseilt. Alle Kabel (sowohl Typ 1 für Blätter mit DMS- aber ohne Kulite-Sensoren, als auch Typ 2 für Blätter mit DMS- und Kulite-Sensoren) wurden mit Schirmgeflecht und Schrumpfschlauch ummantelt (s. Abbildung 6-38, links).

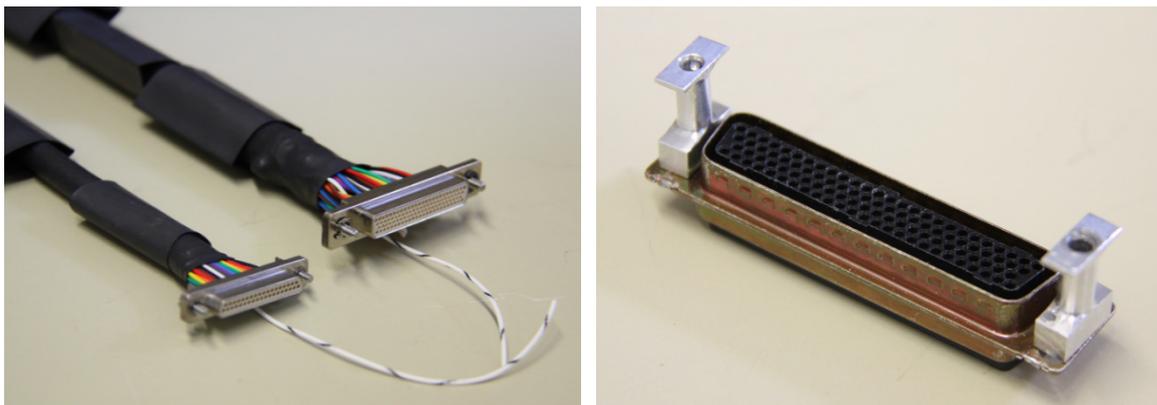


Abbildung 6-38: Blattkabel – Typ 1 & 2; 2DD-Stecker mit I-Profilen für Zugentlastung

Um eine Zugentlastung der Stecker zu gewährleisten, befinden sich kurz vor den rotorkopfseitigen Steckern Kabelbinder unter dem Schrumpfschlauch. Die Zugentlastung an den blattseitigen Steckern ist mittels speziell hergestellter I-Profile aus Aluminium realisiert, die an den 2DD Steckern angebracht werden (s. Abbildung 6-38, rechts).

Blattkabel gleichen Typs sind aufgrund der Pincompatibilität untereinander austauschbar und für verschiedene Blätter (mit und ohne Drucksensoren) und Blattsätze (Bo105 und FTK) einsetzbar.

6.1.5.3 Kalibrierung der Blatt-Anstellwinkelsensoren

Als Sensor zur Messung des Blatteinstellwinkels („Pitch“) werden Linearpotentiometer verwendet, die auf eine Metallplatte mit dem Radius des Blattanschlusses gebogen und verklebt sind. Die Federn zum Überbrücken der Potentiometerstreifen sind am Arm des Blatteinstellwinkelgelenks befestigt. Zur Kalibrierung eines Blatteinstellwinkels wird als Referenz ein Inklinometer-Winkelmesssystem mit zwei Sensoren eingesetzt (Abbildung 6-41), das den Winkel der Blattaufnahme und als Referenz den Winkel des Rotorkopfes misst. Somit ist eine relative Messung der Blattwinkel möglich und eventuelle Fehlerquellen können ausgeschlossen werden.

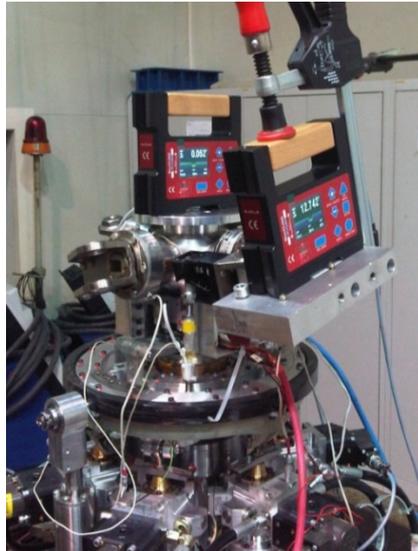


Abbildung 6-41: Kalibrieranordnung Blattanstellwinkel

Die Winkeldifferenz wird an das Datenaufzeichnungssystem weitergegeben. Durch verschiedene Einstellungen der beiden Taumelscheiben in ihrem möglichen Arbeitsbereich ändert sich der Blatteinstellwinkel aller 4 Blätter entsprechend zwischen Minimum und Maximum. Dies wird dazu genutzt, gleichzeitig die Ausgabespannungen der Linearpotentiometer und die jeweiligen Blatteinstellwinkel aufzuzeichnen, woraus sich die Zuordnung für die Kalibrierung ergibt. In Abbildung 6-42 ist beispielhaft eine Kalibrierkurve für Blatt 3 (blau) dargestellt.

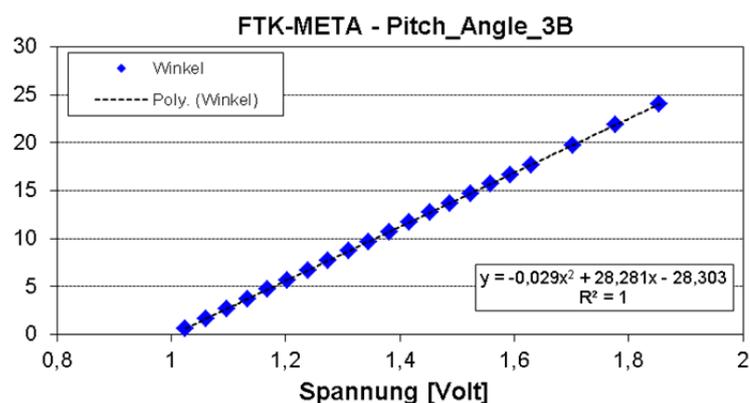
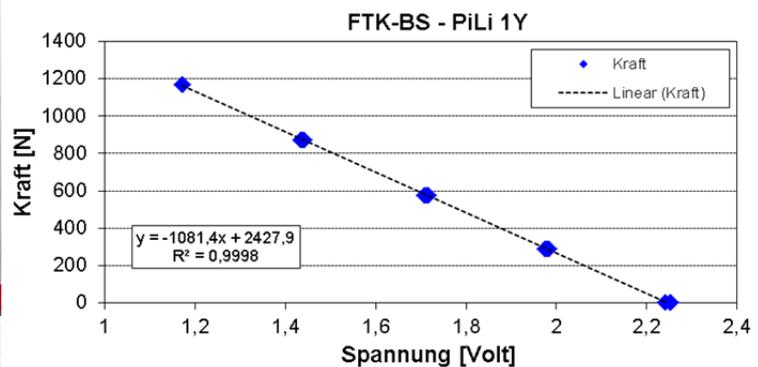
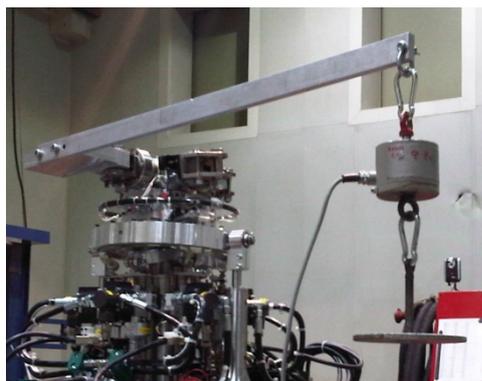


Abbildung 6-42: Kalibrierkurve Blattanstellwinkel Blatt 3 (blau)

Nach der Pitchwinkelkalibrierung erfolgt die Ermittlung der Steuermatrix für die elektrischen Taumelscheibensteller. Hierbei werden die Stellerwege jeweils separat variiert und der Einfluss auf kollektiven und zyklischen Pitch ermittelt. Resultat ist eine lineare 3 x 3 Matrix, die die kinematischen Beziehungen zwischen Taumelscheibenstellung und Pitchwinkelverlauf darstellt. Diese Matrix wird in der Programmierung des HMI (Human Machine Interface, vgl. Abschnitt 6.1.4.1) berücksichtigt.

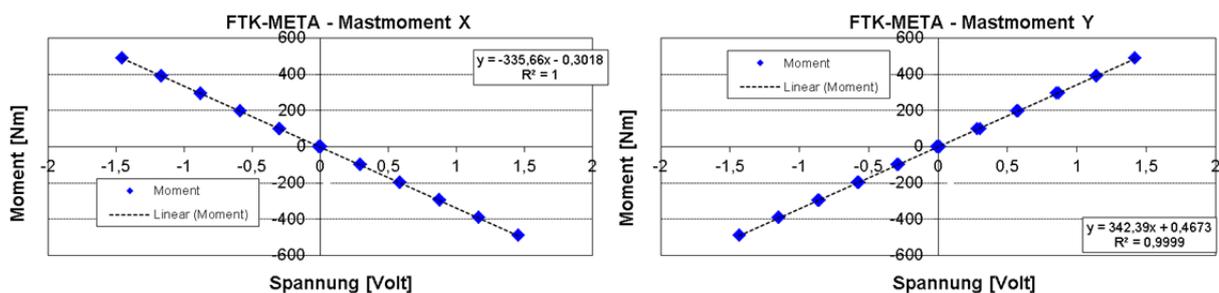
6.1.5.4 Kalibrierung der Steuerstangen-, Aktuatorkräfte und Mastmomente

Die Kalibrierung der Steuerstangenkraftsensoren (DMS) erfolgt im eingebauten Zustand mit Hilfe von definierten Massen, die über einen Hebelarm Kräfte in Zug-Richtung einleiten ([Abbildung 6-43](#), links). Dieses Vorgehen wird für jede der vier Steuerstangen (PiLi – Pitch link) wiederholt. Eine beispielhafte Kalibrierkurve zeigt [Abbildung 6-43](#), rechts. Derselbe Aufbau wird auch dazu benutzt, die 6 Aktuatorkraftsensoren (DMS) zu kalibrieren. Hierzu wird der Rotorkopf mit der belasteten Steuerstange genau über den zu kalibrierenden Aktuator gedreht und ebenfalls über einen Hebelarm Kräfte in Zug-Richtung eingeleitet. Da jede Taumelscheibe von 3 Aktuatoren in Position gehalten wird, und die Anlenkpunkte von Steuerstangen und Aktuatoren in radialer Richtung unterschiedlich sind, wird ein Teil der eingeleiteten Kraft auch von den beiden anderen Aktuatoren aufgenommen und muss bei der Kalibrierung berücksichtigt werden.



[Abbildung 6-43](#): Kalibrieranordnung Steller- und Steuerstangenkräfte; Kalibrierkurve Steuerstangenkraft Blatt 1 (gelb)

Die Biegebeanspruchung des Rotormastes in Längs- und Querrichtung wird mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen ermittelt. Die Kalibrierung der DMS erfolgt in eingebautem Zustand mittels Aufbringen eines Momentes mit Masse und Hebelarm. Die jeweilige Gewichtskraft wird über einen Referenzkraftsensor gemessen. Die aufgenommenen Kalibrierkurven sind in [Abbildung 6-44](#) links und rechts dargestellt.



[Abbildung 6-44](#): Kalibrierkurve Mastmoment um mitdrehende x-Achse (links) und y-Achse (rechts)

6.1.5.5 Kalibrierung der Basissensoren der Modellrotor-Blätter

In jedem Rotorblatt sind Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Überwachung der Schlag-, Schwenk- und Torsionsmomente integriert. Diese müssen vor jedem Test unter Berücksichtigung der kompletten Messkette neu kalibriert werden. Durch Umlenkrollen werden am senkrecht eingespannten Blatt ([Abbildung 6-45](#), links) die nötigen Momente in Richtung Flap, Lag und Torsion eingeleitet und die Spannungen der Blatt-DMS aufgezeichnet. Beispielhaft ist in der rechten Darstellung eine Kalibrierkurve für das Schlagbiegemoment von Blatt 1 (Bo105) bei Radius 290 mm dargestellt.

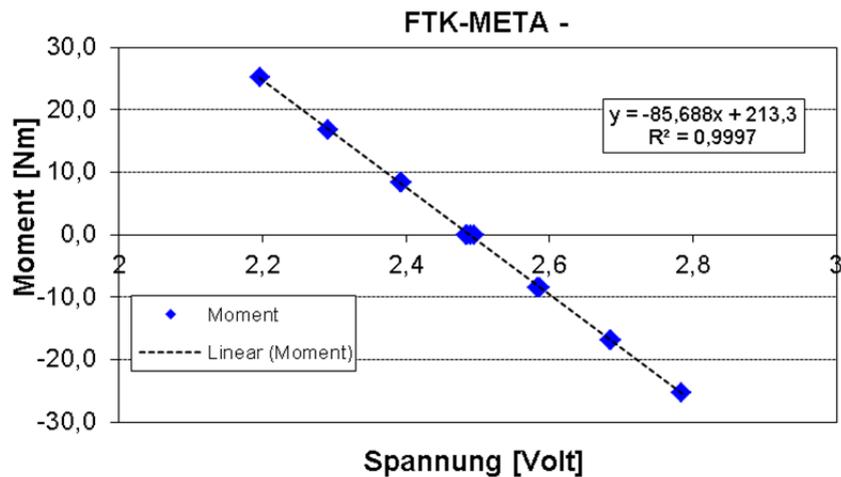
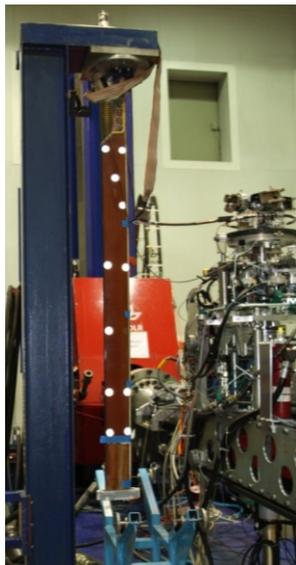


Abbildung 6-45: Zwecks Kalibrierung im Galgen eingespanntes Bo105-Blatt (links); Schlagbiegemoment bei $r/R=14,5\%$ bzw. $R=290\text{mm}$ (rechts)

6.1.5.6 Inklinometer-Kalibrierung

Roll- und Nickwinkel des Rotorversuchsstandes werden über ein Inklinometer vom Hersteller Pepperl+Fuchs (Abbildung 6-46, links) erfasst. Dieser Neigungswinkelsensor kann gleichzeitig die Neigung um die X- und die Y-Achse erfassen, die dann aus je einem Stromausgang (4-20mA) zur Auswertung bereit stehen. Die Auswertung geschieht über das am RVS verbaute B+R System.

Zur Kalibrierung der Neigungswinkel wurde ein geeichter Winkelmesser von BlueClino (Abbildung 6-46, rechts) verwendet. Die Bilder zeigen den Messaufbau bei der Kalibrierung. Kalibriert wurden der Rollwinkel-Messbereich von -5° bis $+5^\circ$ und der Nickwinkel-Messbereich von -15° bis $+15^\circ$.



Abbildung 6-46: Inklinometer-Kalibrierung

6.1.6 Aufnahme und Auswertung der Blatt-Drucksensor-Daten

Der bereits in mehreren Versuchskampagnen eingesetzte Blattsatz vom Typ Bo105 ist neben den Standard-DMS-Sensoren an zwei der 4 Blätter zusätzlich mit dynamischen Drucksensoren der Firma Kulite ausgerüstet. Mit Hilfe dieser Sensoren können Druckverteilungen an der Blattoberfläche hochdynamisch vermessen werden, um z.B. Interaktionen mit Blattwirbeln (BVI-Lärm Ereignisse etc.) oder andere aerodynamische Phänomene am Rotor zu detektieren. Dafür ist allerdings eine entsprechend hohe Abtastrate (Messfrequenz) erforderlich. Mit der Abtastrate steigt allerdings auch der messtechnische Aufwand. Da während der WK-Versuche auch BVI-Lärm vermessen werden soll (inkl. der Wirbel-Interaktionen mit dem Rotor), wurde eine Abtastrate der Kulites von 1024

Messpunkten pro Rotorumlauf festgelegt. Bei dieser hohen Abtastrate können die Daten nicht aufwändig online dargestellt oder weiterverarbeitet werden. Dies ist dann nur offline möglich.

Bei der Aufnahme eines Datenpunktes werden alle Zeitdaten der Messsensoren in eine raw-Datendatei geschrieben. Um diese Aufnahme nicht unnötig zu verlangsamen, werden diese Daten unformatiert (Integer*2-Format) weggeschrieben.

Für die Auswertung der Kulite-Daten werden die entsprechenden Messsensoren mit Hilfe eines speziell hierfür erstellten Programms für jeden gemessenen Datenpunkt in eine Datei, die auf dem Common Data Format (CDF) der NASA basiert, geschrieben. CDF ermöglicht die Erzeugung, den Zugriff auf und den Versand von Daten in einem selbstbeschreibenden und plattformunabhängigen Format. Selbstbeschreibend bedeutet, dass die Datei Informationen über die abgespeicherten Daten enthält. Plattformunabhängig bedeutet, dass die Datei so beschrieben ist, dass sie auf Rechnern mit verschiedenem Abspeicherungsformat für Zahlen, Buchstaben und Gleitkommazahlen verwendet werden kann.

6.1.7 TEDAS2-Konfigurationsprogramm

Die Datenerfassung und -aufzeichnung erfolgt mit einem High-Speed Transputer Expendable Data Acquisition System der 2. Generation (TEDAS2), welcher nach langjähriger Entwicklungszeit beim DLR erstmals für die Anwendung im Windkanalversuch zur Verfügung steht. Nachdem alle hardwareseitigen Änderungsarbeiten an der TEDAS2 Messanlage abgeschlossen waren, wurde diese in Betrieb genommen. Neben der Möglichkeit die Messanlage über ein eingebautes Webinterface zu booten, wurde ein Konfigurationsprogramm erstellt welches den kompletten Zugriff auf alle einstellbaren Parameter der Anlage gewährleistet. Die Schnittstellendokumentation der Messanlage wurde entsprechend angepasst und aktualisiert.

Die Messanlage musste darüber hinaus weiteren Tests bezüglich ihres Umschaltverhaltens zwischen simulierter und realer Rotordrehzahl unterzogen werden. Zur Erläuterung: Die Messanlage wird von extern „getriggert“. Das bedeutet, dass die Messanlage nur zu dem Zeitpunkt Datenpunkte misst und aufzeichnet, wenn ein Impuls am Drehgebereingang der Messanlage eingeht. Um eine kontinuierliche Aufzeichnung zu realisieren müssen an diesen Eingang also fortwährend Impulse geschickt werden. Wenn der Rotor des Rotorversuchsstandes dreht liefert ein mit ihm gekoppelter Inkrementalgeber genau diese Impulse. Fällt die Rotordrehzahl unter einen bestimmten Wert (350 U/min) wird diese Aufgabe von einem künstlichen APS-System (azimuth-angle pulse synthesizer) übernommen. Die Umschaltung zwischen den Systemen muss phasenrichtig erfolgen, damit eine korrekte Zuordnung der aufgezeichneten Daten zum Rotorazimut möglich ist. Dies hat in der Vergangenheit nicht immer korrekt funktioniert (z.B. in der STAR-Kampagne) und damit zu einem erhöhten Aufwand bei der Datenanalyse geführt.

Für den Umschalttest wurde ein Frequenzgenerator an den Drehgebereingang der Anlage angeschlossen, der den Takt des realen Inkrementalgebers simulierte. Weitere Tests erfolgten mit dem im Versuch verwendeten Drehwinkelgeber, welcher mittels Ersatz-Elektroantrieb auf Drehzahl gebracht wurde. Sowohl die Tests mit dem Frequenzgenerator als auch mit dem Inkrementalgeber konnten korrektes Umschaltverhalten nachweisen.

6.1.8 Konzeption, Beschaffung und Test von Dünnschichtsensortechnik

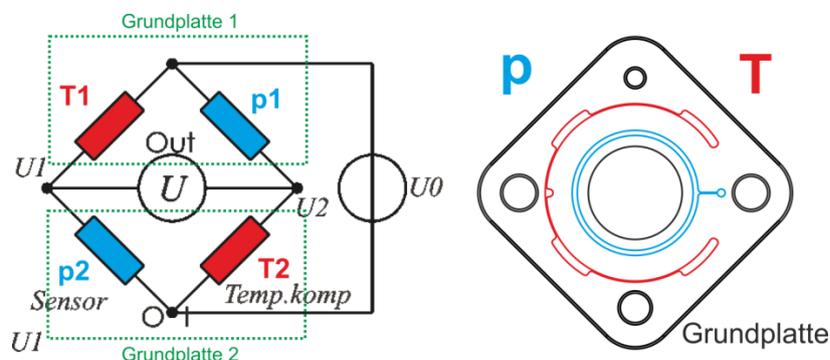
Bei der Suche nach einem adäquaten Ersatz der bisher verwendeten Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Erfassung der dynamischen Lasten im Steuerstrang ist das DLR auf die vom Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) entwickelten Dünnschichtsensoren (DSS) gestoßen. Diese sollten hauptsächlich in den Steuerstangen oberhalb der Taumelscheiben sowie an den Aktuatoren und evtl. deren Fußplatten zum Einsatz kommen. Langfristiges Ziel ist der vollständige Ersatz der DMS durch die neuartigen DSS, wenn diese sich als einsatzfähig erweisen. Ein großer Vorteil der DSS besteht in dem guten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses und in ihrer Applikation, denn im Gegensatz zu DMS müssen DSS nicht aufwändig mit den Bauteilen verklebt werden, sondern können auf separaten Sensorträgern aufgebracht vergleichsweise einfach in den Kraftfluss eingebaut werden.

Nachteilig wirkt sich dagegen die starke Temperaturempfindlichkeit der DSS aus, weshalb bei der Entwicklung der Sensoren zwingend auf eine Temperaturkompensation geachtet werden muss. Bei Bewertungstests in Braunschweig wurde die Einsatzfähigkeit der für das DLR speziell gefertigten Sensorik eingehend geprüft. [Abbildung 6-47](#) zeigt links eine sogenannte Kraftmessende Unterlegscheibe von Fraunhofer IST und rechts einen auf diesem Prinzip aufbauenden Dummy-Sensor an einer Steuerstange.



[Abbildung 6-47](#): Kraftmessende Unterlegscheibe auf Dünnschichtsensorbasis (Halbbrücke, Fraunhofer, links), DLR-eigene Applikation an einer Steuerstange (Vollbrücke, rechts)

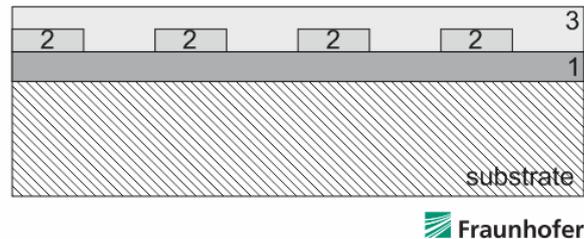
Da die Sensoren für ihre Anwendung in der Steuerstange aus Gründen des Temperatenausgleiches und der Sensitivität als Wheatstone'sche Vollbrücke ([Abbildung 6-48](#) links) ausgeführt werden müssen, werden für einen voll funktionsfähigen Sensor zwei Grundkörper benötigt, deren Beschichtung anteilig auf Druck oder Temperaturänderungen reagiert. Bei entsprechender Anordnung und elektrischer Verschaltung zweier solcher Grundkörper erhält man eine Vollbrücke inklusive Temperaturkompensation. Der zusammengesetzte Sensor kann dann in den Lastpfad der Steuerstange entsprechend der [Abbildung 6-47](#) (rechts) integriert werden.



[Abbildung 6-48](#): Wheatstone'sche Vollbrücke (links), Sensorgeometrie auf Grundkörper (rechts)

Aus Fertigungsgründen des sensitiven Schichtsystems und der Temperaturkompensation (der temperatursensitive Schichtanteil darf keine mechanische Last aufnehmen) kam dem Design der Sensorschichtgeometrie besondere Bedeutung zu. In einem iterativen Prozess und in enger Absprache mit dem für die Beschichtung zuständigen Fraunhofer IST wurde eine Schichtgeometrie entworfen, die den gestellten Anforderungen entsprach. Die Anordnung der sensitiven Schichtanteile sowie die Aufteilung in Druck- und Temperatursensorschicht ist in [Abbildung 6-48](#) rechts dargestellt.

Der Schichtaufbau für die Dünnschichtsensoren (siehe [Abbildung 6-49](#)), besteht aus der sensitiven Schicht aus Diaforce® (1) sowie darauf aufgebrachtten Elektroden zum elektrischen Anschluss (2) sowie einer Deckschicht, die als Schutz und Isolator wirkt (3). Das Aufbringen der unterschiedlichen, jeweils nur wenige μm dicken Schichten auf dem Grundkörper (Substrat), geschieht durch mehrere Plasmaprozesse bzw. „Sputtering“.



 Fraunhofer

Abbildung 6-49: Schichtaufbau für Dünnschichtsensorik

Insgesamt wurden 40 Grundkörper durch das Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik beschichtet und strukturiert, von denen für die geplanten Versuche mindestens vier, idealerweise jedoch 10 Sensoren (4 x Steuerstangenlasten, 6 x Aktuatorlasten) zuzüglich Ersatzsensoren benötigt werden. Bei der Produktion wurde dieser Overhead von 50% eingeplant, um Ausschuss durch anfängliche Prozessparameteroptimierung und eventuell nötige Designrevisionen zu berücksichtigen.

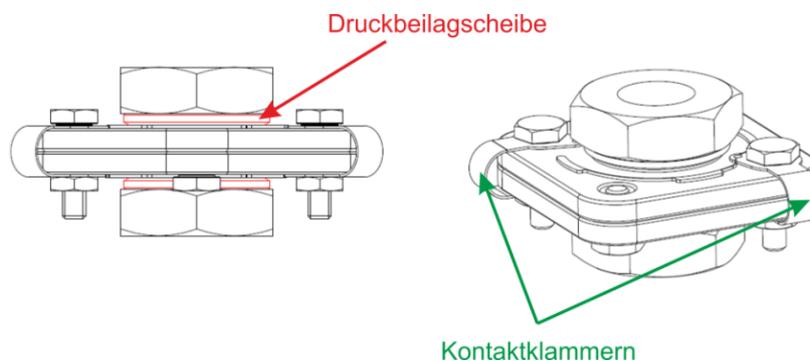


Abbildung 6-50: Zusammenbauzeichnung für fertigen Sensor (Vollbrücke)

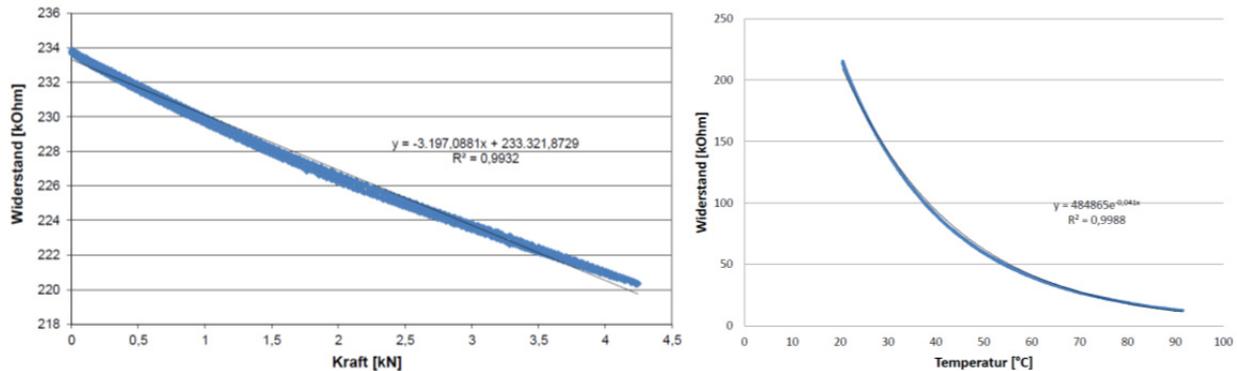
Am DLR-FT wurde das Konzept für den Sensorzusammenbau und die Verschaltung der beiden Sensorplatten zu einer Wheatstone-Brücke (siehe hierzu [21]) entwickelt. Dabei erfolgt die elektrische Verbindung der zwei zu einem Sensor verschalteten Grundkörper an jeweils zwei Punkten durch speziell ausgeformte Kontaktklammern aus Federstahl, die jeweils mit einer Schraube an der Sensorplatte befestigt werden (siehe Abbildung 6-50).

Sämtliche am Fraunhofer IST fertig beschichteten und prozessierten Sensorgrundkörper wurden nach der Fertigung durch das IST Qualitätstest unterzogen (Widerstandsmessungen der Sensorschicht, Prüfung auf Kurzschlüsse zum Substrat, Untersuchung der Schichtdickenverteilung, etc.), die für alle ausgelieferten Sensoren sehr zufriedenstellend verlaufen waren.



Abbildung 6-51: Fertigestelltes Sensorelement (links) - Test im Labor am Fraunhofer IST zur Aufnahme von Kennlinien (rechts)

Mit Hilfe von Belastungstests unter Laborbedingungen am Fraunhofer IST wurden die Sensorkennlinien ermittelt (s. [Abbildung 6-51](#)). Dazu wurden die Sensorelemente verschiedenen Temperaturen ausgesetzt (T-R Kennlinie) und in einer Einspannvorrichtung mit bis zu 4000N belastet (F-R Kennlinie). Der Lastbereich von 0-4 kN entspricht dabei in etwa der im Einsatz an der Steuerstange zu erwartenden Last von 2000 N Vorspannung ± 2000 N Wechsellast beim Betrieb des Modellrotors. Die aufgenommenen Kennlinien aller Proben zeigen im Bereich 0-4 kN einen nahezu linearen Verlauf sowie eine Sensitivität von etwa 3-4 kOhm/kN (siehe [Abbildung 6-52](#), links: Probe 20 bei ca. 20° Umgebungstemperatur).



[Abbildung 6-52](#): Kraft- (links) und Temperaturkennlinie (rechts) von Probe 20

Die an Probe 20 zusätzlich unter der Belastung von 1 kN aufgenommene Temperaturkennlinie (siehe [Abbildung 6-52](#), rechts) verläuft wie erwartet nichtlinear. Für die Temperaturkompensation im fertig zusammengebauten Sensor (welcher als Vollbrücke aus zwei Sensorelementen besteht), spielt die Übereinstimmung der Temperaturkennlinien zweier Sensorelemente eine entscheidende Rolle, da wie exemplarisch in [Abbildung 6-52](#) an Probe 20 dargestellt die Temperaturabhängigkeit wesentlich stärker als die Lastabhängigkeit ist.

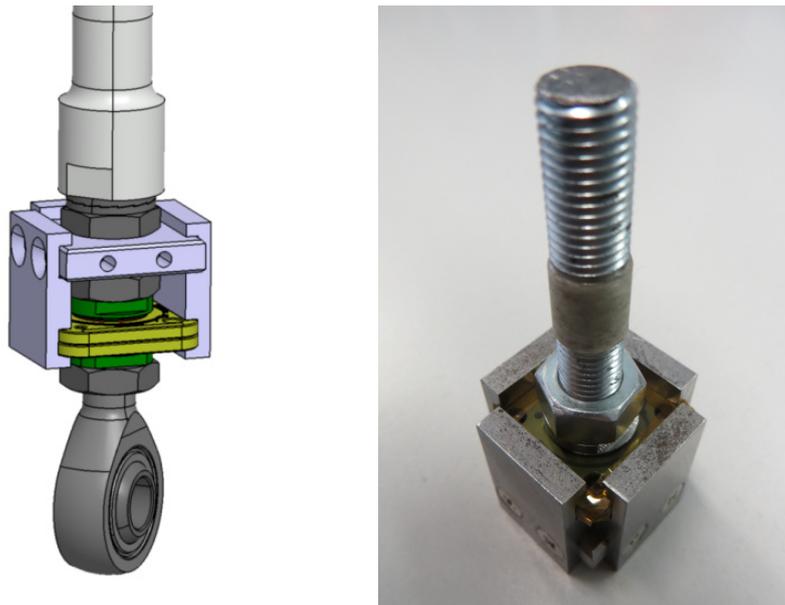
Als weiterer wichtiger Punkt stellte sich heraus, dass die Kontaktierung mit Hilfe der entwickelten Kontaktklammern nicht funktionierte und teilweise bei zu festem Anziehen sogar zu Kurzschlüssen führte, was ggf. auch auf eine fehlerhafte Beschichtung der Deckschicht im Bereich der Kontaktpunkte zurückzuführen ist ([Abbildung 6-53](#)). Da auch ein direktes Anlöten nicht funktionierte wurden durch IST Kabel direkt an die Kontaktpunkte geklebt. Dies war schließlich erfolgreich.



[Abbildung 6-53](#): Fehlerhafte Beschichtung in der Nähe der Kontaktflächen

Nach der Übergabe an das DLR wurden sämtliche Sensoren intensiven Temperatur- und Lasttests in unterschiedlichen Konfigurationen (inkl. Voll- und Halbbrückentests) der Proben unterzogen. Dabei konnte die vollständige Kompensation von Temperatureinflüssen sowohl in Voll- als auch in Halbbrückenschaltung leider nicht erreicht werden, da die Temperaturabhängigkeit aller Proben stark unterschiedlich ist. Ferner war es nicht möglich mechanische Belastungen in der angedachten Konstruktion zu messen, da sich die Dehnungen der Steuerstangengewinde, an denen die Sensorplatten angebracht wurden, als zu gering erwiesen (zu geringe Messempfindlichkeit).

Bezüglich der Messunempfindlichkeit wurde die Konstruktion der Messbrücke in einem weiteren Versuch so umgearbeitet, dass der Kraftfluss in einer Art äußeren Klemmung nur noch über die DSS-Platten und nicht mehr über das Gewinde der Steuerstangen geht (vgl. [Abbildung 6-54](#)).



[Abbildung 6-54](#): Alternative Sensoraufnahme

Leider führten auch der veränderte Kraftfluss und der gesicherte elektrische Anschluss der Sensoren zu keinem wesentlich verbesserten Verhalten der Sensoren, so dass schlussendlich entschieden werden musste, die Steuerstangen mit der vorgesehenen DSS vorerst nicht zu bestücken, da die Sensorplatten als Ergebnis dieser umfangreichen Tests als nicht einsatzfähig anzusehen sind.

Die große Temperaturabhängigkeit aller Proben ist die stärkste Einflussgröße auf die Messergebnisse, was eine Verwendung in der angedachten Form unmöglich macht. Die Streuung der Materialeigenschaften der einzelnen Sensorplatten ist selbst innerhalb der gleichen Produktionschargen so groß, dass die vorgesehene Kombination zweier Sensorplatten zu einer Vollbrückenschaltung nicht realisiert werden konnte. Als Halbbrücke hingegen ist die Kraftempfindlichkeit für den Einsatzzweck um mehrere Größenordnungen zu gering.

Die alternative Konstruktion, wo die DSS über eine Art Klammer in die Steuerstangen integriert werden ([Abbildung 6-54](#)) hat überdies sicherheitskritische Aspekte. Da der obere und der untere Teil der mit DSS ausgerüsteten Steuerstangen nicht mehr starr verbunden ist, sondern einzig über die Klemmverbindung zusammengehalten wird, sind Spiel und Verschleiß bis hin zum Versagen der Klemmen und damit der Steuerstangen aufgrund der während des Betriebes auftretenden Steuerstangenlasten nicht vollständig auszuschließen.

Aus den genannten Gründen wurde beschlossen, die Aktivitäten im Bereich der DS-Sensorik im Rahmen des Projektes einzustellen und die Technologie nicht im Windkanalversuch einzusetzen. Der Sensoraufbau und die Sensorintegration bedürfen einer grundlegenden Überarbeitung bevor sie für weitere Versuche in Betracht kommen.

6.1.9 Erprobung der META in der Rotorhalle nach deren Wiederaufbau

6.1.9.1 Überwachung der Taumelscheiben

Zur Überwachung der Taumelschreiben wurden an den nichtdrehenden Ringen der äußeren und inneren Taumelscheibe 3-Achs-Beschleunigungssensoren verbaut (vgl. [Abbildung 6-55](#)).

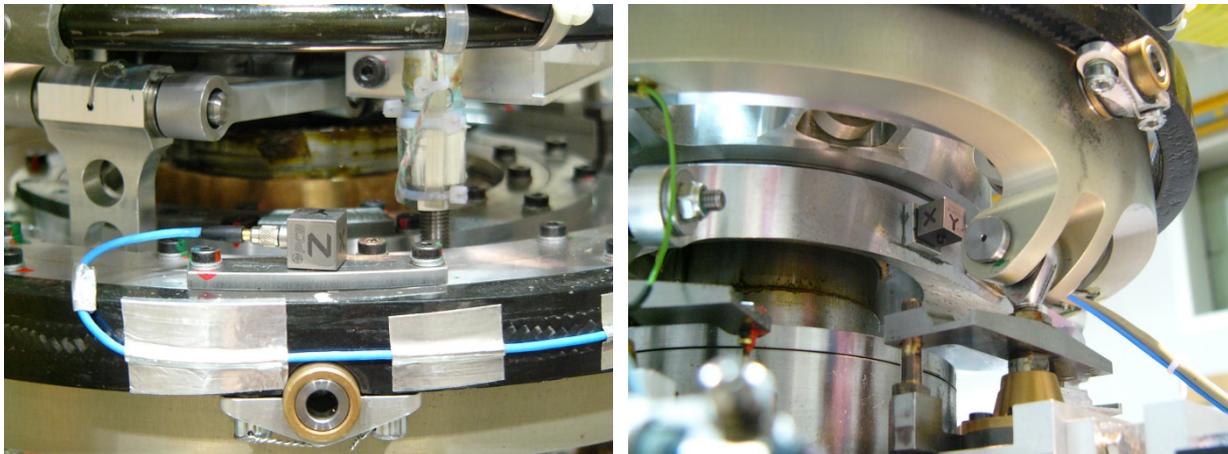


Abbildung 6-55: Beschleunigungssensoren an der äußeren (li.) und inneren (re.) Taumelscheibe

Zwecks Realisierung einer Zustandsüberwachung (engl. Health and Usage Monitoring System – HUMS) der Taumelscheiben hinsichtlich Schädigung und Lebensdauerverbrauch werden die Zeitsignale der Beschleunigungssensoren bereits bei der Aufnahme eines neuen Referenzdatenpunktes verarbeitet. Zur Erfassung und Analyse eines möglichst breiten Frequenzspektrums werden die Beschleunigungssensoren mit 1024 Messpunkten pro Rotorumlauf deutlich höher abgetastet, als die restliche Messsensorik des RVS. Nachdem die Zeitsignale der Beschleunigungssensoren erfasst sind, können die Frequenzspektren dieser Sensoren als Übersichtsplot getrennt nach der äußeren und inneren Taumelscheibe auf einer Seite darstellt und ausdruckt werden ([Abbildung 6-56](#)). Dies dient der schnellen Überprüfung der Sensorwerte. Es kann sofort festgestellt werden, ob im Frequenzspektrum ungewöhnliche Frequenzen auftreten, die auf einen Defekt hinweisen könnten.

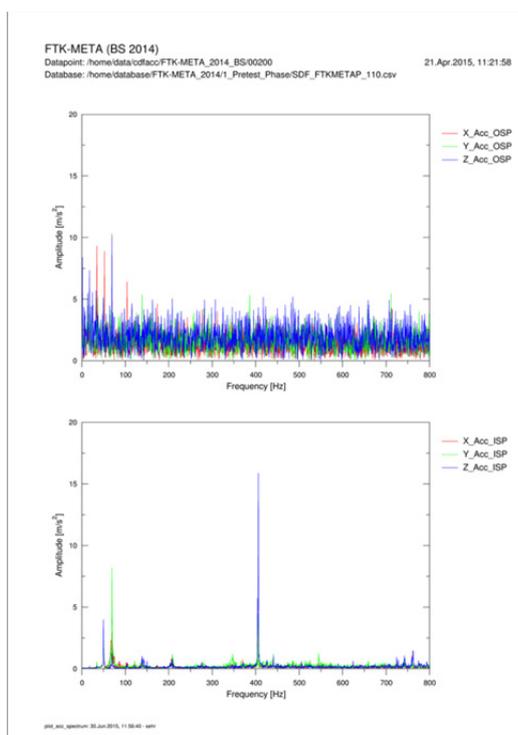


Abbildung 6-56: Beispielplot der Frequenzspektren der äußeren und inneren Taumelscheibe

Ferner können Übersichtsdiagramme von den sechs Beschleunigungssensoren aller Referenzdatenpunkte, die bereits aufgenommen wurden, erstellt (Abbildung 6-57) werden. Dabei werden die Sensoren an den Frequenzen überprüft, die bei auftretenden Schäden deutliche Veränderungen zeigen sollten. Die Erwartung ist, dass man anhand dieser Darstellung schleichende Veränderungen erkennen kann, und so frühzeitig detektiert, ob einer der beiden Lagerringe oder evtl. eine Kugel im Lager kaputt gehen.

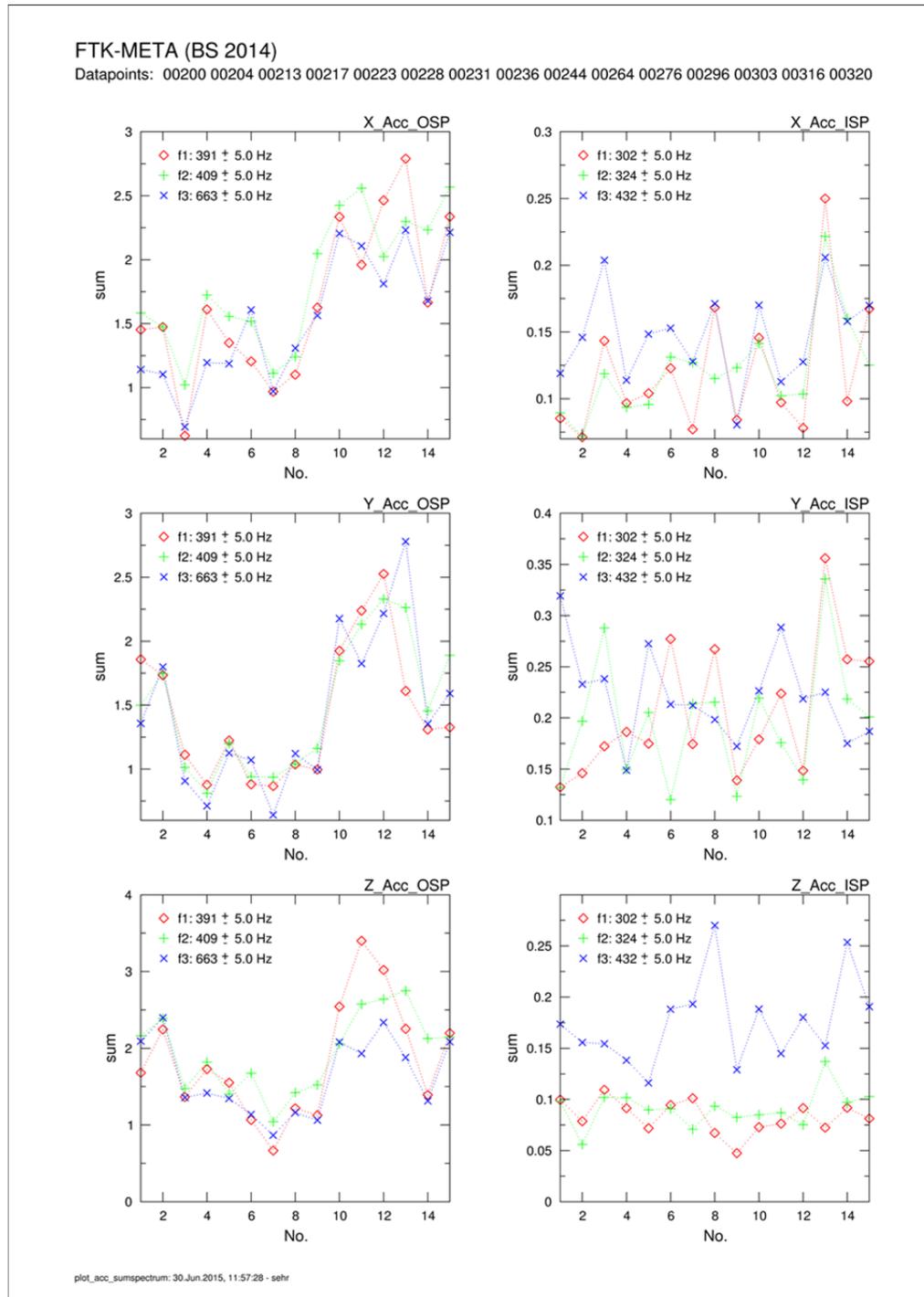


Abbildung 6-57: Übersichtsdiagramm mit ausgewählten Frequenzen für die innere und äußere Taumelscheibe

Datum und Uhrzeit der Messpunkte werden mit aufgezeichnet und werden zur Ermittlung der Betriebsstunden ausgewertet. Im Fall einer Schädigung kann die Lebensdauer der Bauteile anhand der gespeicherten Daten errechnet werden.

6.1.9.2 Überwachung der Blattdrücke

Zwei der im DNW-Versuch verwendeten Bo105-Modellrotorblätter sind neben den Standard-DMS-Sensoren mit dynamischen Drucksensoren (Kulites) ausgerüstet. Mit Hilfe dieser Sensoren können Druckverteilungen an der Blattoberfläche hochdynamisch vermessen werden, um z.B. Interaktionen mit Blattwirbeln (BVI-Lärm Ereignisse etc.) oder andere aerodynamische Phänomene am Rotor zu detektieren. Dafür ist genau wie bei den Beschleunigungssensoren eine entsprechend hohe Abtastrate von 1024 Messpunkten pro Rotorumlauf festgelegt worden. Bei dieser hohen Abtastrate können die Daten allerdings nicht mehr aufwändig online dargestellt oder weiterverarbeitet werden. Dies ist dann nur offline bzw. zur Messung leicht zeitverzögert möglich.

Eine Auswahl der Zeitsignale kann mit Hilfe speziell dafür entwickelter Auswertesoftware als Übersichtsplot auf einer Seite darstellt und ausdruckt ([Abbildung 6-58](#)) werden. Dies dient zur schnellen Überprüfung der Sensoren. Dadurch kann man zeitnah nach der Messung feststellen, ob die Sensoren noch funktionstüchtig sind, ob sie Störungen aufweisen oder ob sich die Offsets der Signale verschoben haben. Die weiterführende Analyse der Druckdaten erfolgt dann ausschließlich offline.

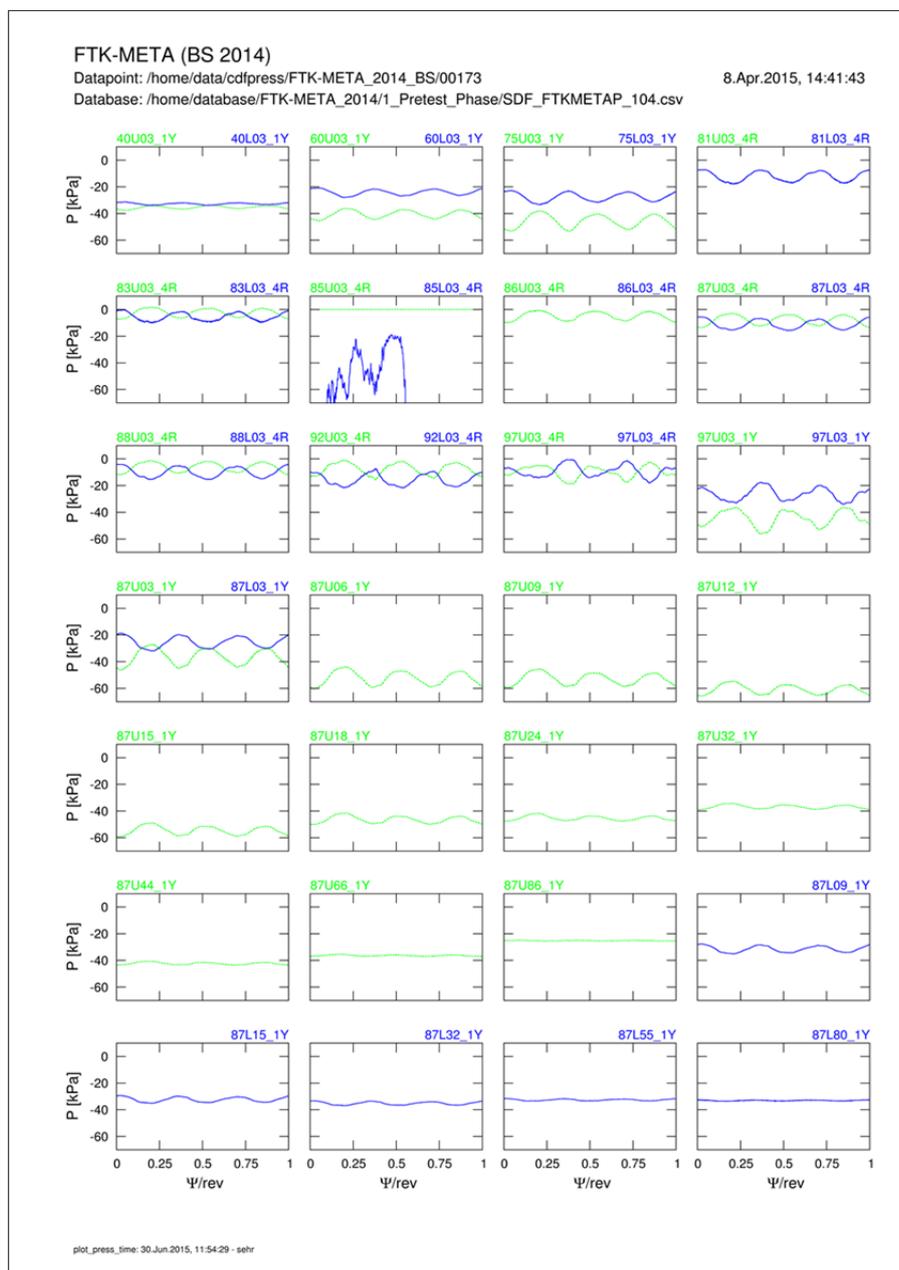


Abbildung 6-58: Übersichtsplot der Kulite-Drucksensoren des Bo105-Blattsatzes

6.1.9.3 Standschwingversuch

Um eventuell vorhandene System-Resonanzfrequenzen zu bestimmen, wird vor jedem Test ein Standschwingversuch durchgeführt. Eine ungünstige Kombination aus Standeigenfrequenz und Schwenkeigenfrequenz der Rotorblätter kann in bestimmten Drehzahlbereichen des Rotors zu kritischen Resonanz-Phänomenen (Bodenresonanz) führen, die Schäden am Modell verursachen könnten. Da mit den Modifikationen an der META-Hardware und den neuen Blättern Massen- und Steifigkeitsänderungen einhergehen, ändern sich auch die Systemfrequenzen.

Zur Durchführung des Standschwingversuchs wurde das Modell mit mehreren Beschleunigungssensoren ausgestattet und mit elektromagnetischen Erregern bei verschiedenen Frequenzen in verschiedenen Richtungen zum Schwingen angeregt (Abbildung 6-59). Aus dem Verhältnis der gemessenen Systemantwort zu eingeleiteter Kraft können über ein Frequenzspektrum Rückschlüsse auf das Resonanzverhalten gezogen werden.

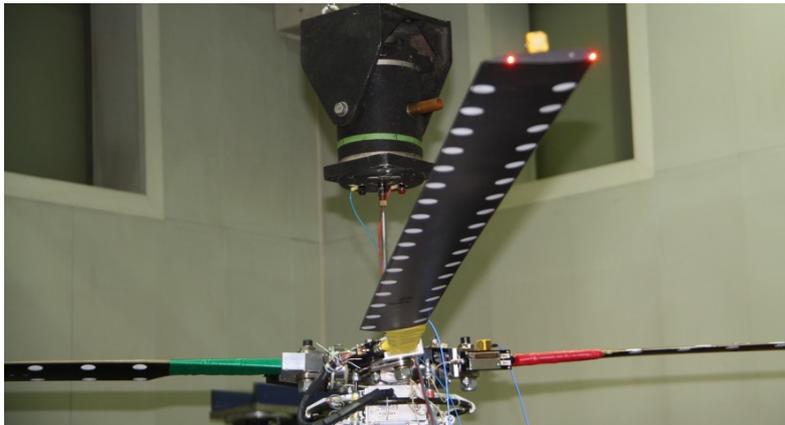


Abbildung 6-59: Schwingungsanregung in z-Richtung mittels elektromagnetischem Shaker

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass für beide Blattsätze im normalen Operationsbereich keine kritischen Drehzahlbereiche existieren. Abbildung 6-60 zeigt exemplarisch das Bodenresonanzdiagramm des RVS mit installierten Bo105-Modellrotorblättern. Bodenresonanz entsteht dann, wenn (in der Regel) die sehr schwach gedämpfte regressive Schwenkbewegung (das ist die normierte Rotordrehfrequenz minus der Schwenkeigenfrequenz) in Wechselwirkung mit einer der Standeigenfrequenzen in Rollen oder Nicken tritt.

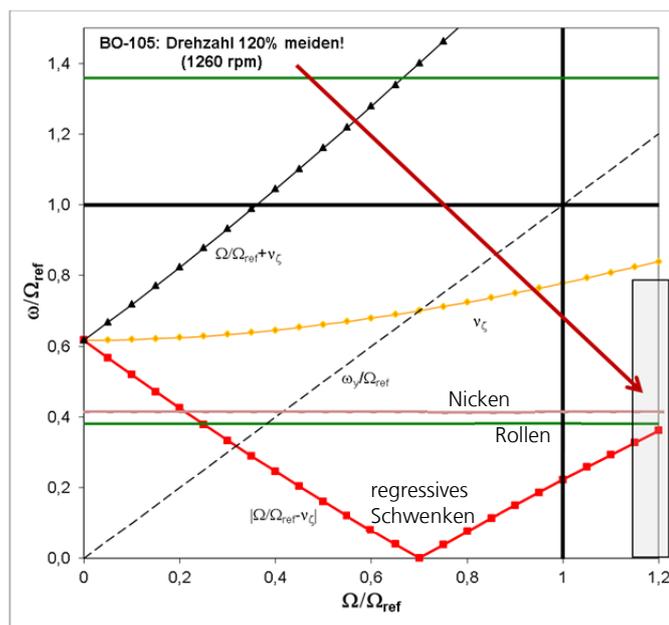


Abbildung 6-60: Bodenresonanzdiagramm des Rotorversuchsstandes mit Bo105-Blättern

Durch die Schwenkbewegung aller Rotorblätter wird der Rotorgesamtschwerpunkt aus dem Rotorzentrum heraus verschoben und bewegt sich periodisch um das Rotorzentrum herum. Wenn sich dann die Frequenzen aus dieser Bewegung und der von Rollen oder Nicken decken entsteht Resonanz. Je nachdem wie viel Energie dabei im System steckt, kann sich diese Resonanz sehr schnell aufschaukeln bis hin zur Zerstörung des Gesamtsystems. Da der Schnittpunkt der regressiven Schwenkbewegung (rote Linie) und der Rollbewegung (grün) bzw. Nickbewegung (rosa) oberhalb von 120% der Nenn Drehfrequenz liegt, besteht im Normalbetrieb keine Bodenresonanzgefahr. Beim Schnittpunkt bei ca. 20-25% (ca. 210-260rpm) steckt noch nicht viel Energie im System. Dieser Bereich wird beim Hochfahren des Rotors ohne Stopp schnell durchfahren.

6.1.9.4 META Erprobung

Nachdem das System wiederhergestellt, alle Sensoren kalibriert und die Messpfade geprüft waren, erfolgte ab März 2015 die Erprobung des META-Systems, zunächst im nicht-drehenden Zustand. Die Funktionalität des Systems und des zugehörigen Steuerungsprogramms konnte dabei erfolgreich nachgewiesen werden.

In den anschließenden Tests mit rotierendem Rotor, jedoch ohne Rotorblätter wurden sämtliche Varianten der implementierten Steuermöglichkeiten (n/rev, TPP-Splitting, Tracking usw.) erprobt. Auch hier konnte die volle Funktionalität nachgewiesen und wichtige Erkenntnisse zur Optimierung der Ansteuerung des Systems gesammelt werden.

Ab Ende März 2015 wurde dann damit begonnen worden, das Gesamtsystem inklusive Rotorblättern in Betrieb zu nehmen. Hierzu wurde der Bo105 Blattsatz montiert ([Abbildung 6-61](#)) und die generellen Arbeitsschritte, wie Einstellen des Blatt-Spurlaufs und Auswuchten des Gesamtrrotorsystems, durchgeführt. Weiterhin fanden Tests mit unterschiedlichen Kollektiv- und Zyklussteuerungen statt, um die Datenaufzeichnung sowie das allgemeine Systemverhalten zu prüfen. Das META-System wurde anschließend mit allen Einsteueroptionen bei Nenn Drehzahl und moderatem Rotor-schub getestet und die gemessenen Daten ausgewertet (siehe Abschnitt 6.2.3).

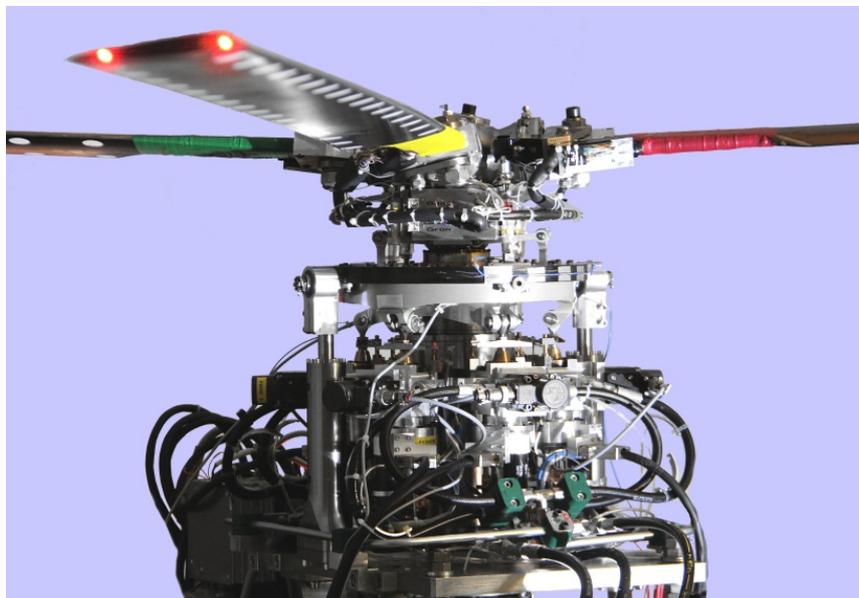


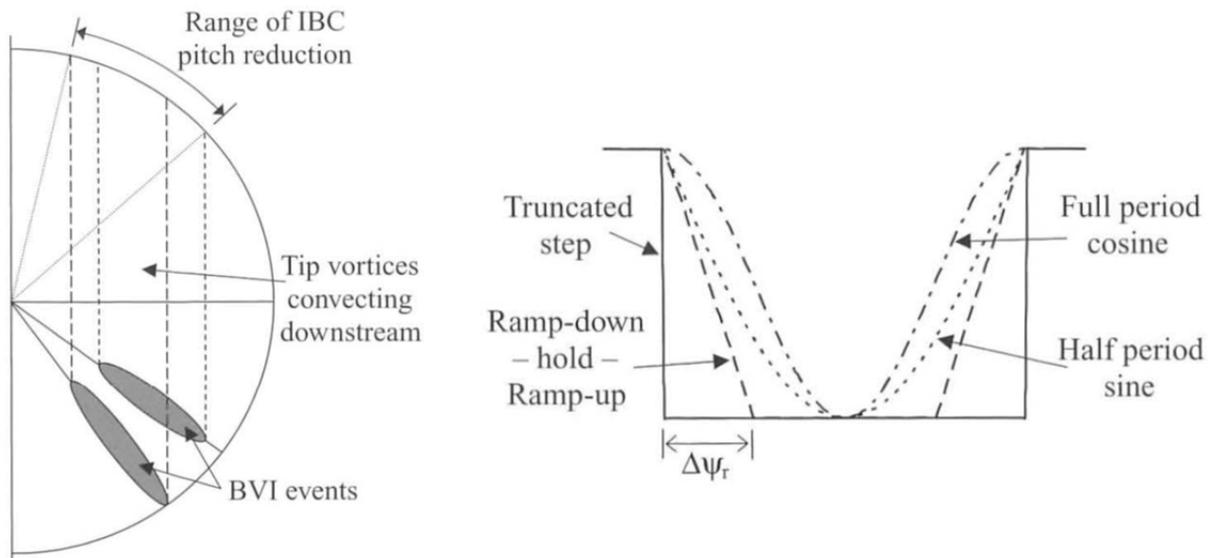
Abbildung 6-61: META-Steuerungssystem auf dem RVS mit Bo105-Blattsatz

Alle Systemtests nach der Wiederinbetriebnahme verliefen positiv und es sind dabei keine unvorhergesehenen Probleme aufgetreten. Die Systemtests wurden anschließend mit dem FTK-Blattsatz wiederholt. Auch diese Tests verliefen uneingeschränkt positiv. Das Gesamtsystem war somit einsatzbereit für den im September 2015 angesetzten Windkanalversuch.

6.2 Arbeitspaket AP3.3.2: Weiterentwicklung der Steuer- und Regelgesetze

6.2.1 Entwicklung von Steuergesetzen für lokale Pitchwinkeländerungen

Um das Potential der META für eine Lärmreduktion voll auszuschöpfen, wurde die bestehende Steuersoftware in ihrer Funktionalität erweitert. Neben konventionellen HHC- und IBC-Einsteuerungen sollten auch lokale Pitchwinkeländerungen unterschiedlicher Form über Sektoren von ca. 40° Azimut steuerbar sein (s. [Abbildung 6-62](#)). Diese Art Einsteuerung hatte in theoretischen Untersuchungen und Simulationen [11] bereits hohes Potential zur Verminderung von BVI-Lärm erkennen lassen.



[Abbildung 6-62](#): Azimutale Position (links) und unterschiedliche Formen (rechts) der untersuchten lokalen Pitchwinkeländerungen [7]

Von den vier abgebildeten IBC-Input Profilen – Stufe, Lineare Rampe, Halb-Sinus und Cosinus – kommt für praktische Versuche nur das Cosinus-Profil in Frage, da es an keiner Stelle Unstetigkeiten aufweist. Unstetigkeiten wie Spitzen oder Knicke im Profil würden in ihrer Umsetzung extrem hohen Beschleunigungen der Aktuator Kolben erfordern, für die weder die derzeitige Hardware noch die Regelungssoftware ausgelegt sind.

Das für die META ausgewählte IBC-Input-Profil unterteilt sich in drei Abschnitte, die jeweils einzeln parametrisiert werden können:

- Absenkung des Pitchwinkels mittels Cosinus-Funktion
- Halten des abgesenkten Pitchwinkels
- Erhöhung des Pitchwinkels über Cosinus-Funktion

Als Vorbereitung auf die Implementierung dieser Funktionalität in die Echtzeit-Steuersoftware wurden die dafür nötigen Steuergesetze formuliert und die Matlab-basierte Kinematiksimulation der META entsprechend erweitert. Diese Vorarbeiten dienten dazu, die Steuergesetze zu überprüfen und zu evaluieren, ob die aus den Einsteuerungen resultierenden Aktuatorbewegungen durch die (auf harmonischen 1/rev-12/rev Signalen basierende) Vorsteuerung im Regelungsalgorithmus abgedeckt werden, oder ob dafür weitere Modifikationen notwendig gewesen wären.

Neben der oben erwähnten reinen Cosinus-Rampe mit zusätzlicher „hold“-Funktion im abgesenkten Bereich, wurden auch Rampen mit unterschiedlicher Steilheit bei „pitch-down“ und „pitch-up“ realisiert. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Steuermodi bietet [Abbildung 6-63](#).

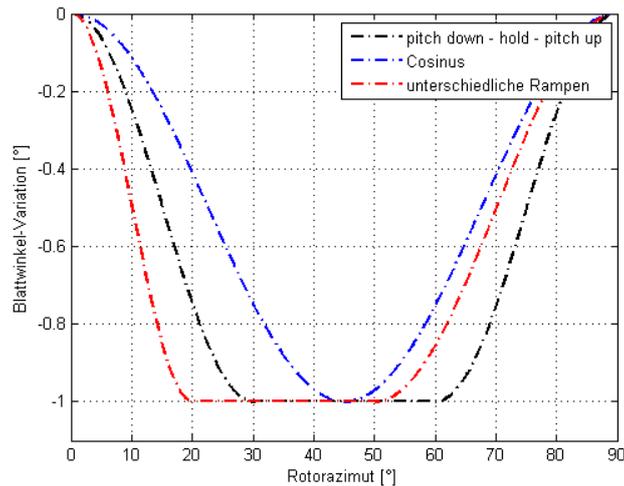


Abbildung 6-63: Unterschiedliche „Local Pitch Dip“ – Steuermodi

Um beurteilen zu können, ob solche Steuerfunktionen mit der vorhandenen Hardware realisiert werden können, wurden die aus den vorgegebenen Steuersignalen (Cosinus mit und ohne „hold“ symmetrisch) resultierenden Aktuator-Stellwege für exemplarische Steuerfälle ermittelt und anschließend mit Hilfe einer FFT in ihre harmonischen Anteile zerlegt. Hintergrund ist, dass die in der Positionsregelung eingesetzte Vorsteuerung (auf dem dSPACE-System) alle Rotorharmonischen bis hin zur 12/rev berücksichtigt, und diese Frequenzen damit – theoretisch – regelbar sind.

Im Rechenbeispiel wurde das Aktuatorsignal nach der harmonischen Zerlegung anschließend unter Vernachlässigung aller Rotorharmonischen $>12/\text{rev}$ bzw. $>4/\text{rev}$ resynthetisiert. Der Vergleich des Aktuatorsignals mit dem resynthetisierten Signal (siehe [Abbildung 6-64](#)) zeigt, wie gut sich das Aktuatorsignal durch die 12 Rotorharmonischen abbilden lässt und bildet einen ersten Anhaltspunkt für die später erreichbare Regeltreue des Systems.

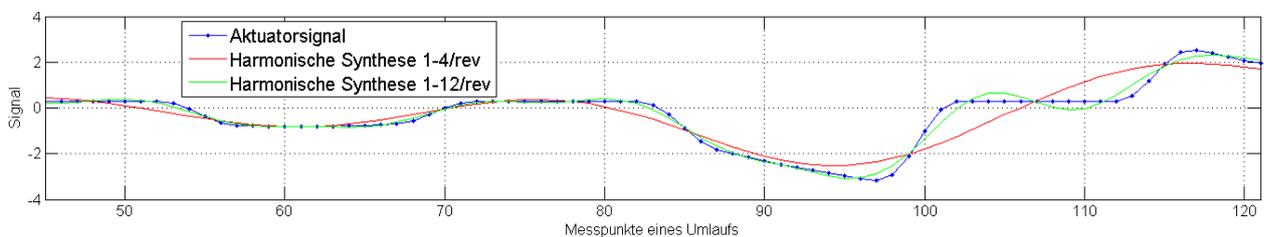


Abbildung 6-64: Vergleich zwischen Aktuatorsignal harmonisch resynthetisierten Signalen

Wie in [Abbildung 6-64](#) zu erkennen ist, lässt sich das aus einem „pitch down – hold – pitch up“-Steuerfall resultierende Aktuatorsignal (blau) mit den Rotorharmonischen 1-12/rev noch relativ gut abbilden. Werden allerdings nur die ersten vier Rotorharmonischen verwendet, sinkt die Abbildungsqualität deutlich. Diese Erkenntnis ist insofern von Relevanz, da die Leistungsfähigkeit der Aktuatoren in Bezug auf die Bandbreite der möglichen Steuersignale limitiert ist. Wegen der anfänglich bestehenden Resonanzprobleme wurden außerdem Tiefpass-Filter in die Steuerung eingebaut, so dass Steuerfrequenzen oberhalb von 6/rev nicht möglich waren. Da Systemsicherheit nicht nur für diesen Fall Vorrang vor der Präzision hat, wurden Abweichungen von der Soll-Vorgabe des Steuersignals toleriert.

6.2.2 Modifikation der Ansteuerung der Aktuatorik für 3/rev-Steuer im drehenden System

Bei einer klassischen HHC-Steuerung können durch Aktuatorbewegungen mit einem n -fachen Vielfachen der Rotordrehfrequenz $n \cdot \Omega$ im drehenden System Blattsteuer mit den Frequenzen $(n \pm 1) \cdot \Omega$ erzeugt werden. Dementsprechend wurden bislang am 4-Blatt Modellrotor mittels der Mehrfachtaumelscheibe 3/rev-Signale im drehenden System durch Aktuatorbewegungen mit einer Frequenz von 4/rev erzeugt und eingesteuert.

Da der 4-Blatt Rotor aber durch die Verwendung der Mehrfachtaumelscheibe in zwei unabhängige 2-Blatt Rotoren aufgeteilt wurde, ergibt sich durch die veränderte Kinematik die Möglichkeit, vom klassischen HHC-Steuerprinzip bzgl. des Gesamtrrotors abzuweichen. Jeder der beiden unabhängigen 2-Blatt Rotoren ist kinematisch unterbestimmt, da den drei Freiheitsgraden der jeweiligen Taumelscheibe nur zwei Freiheitsgrade (Blattsteuerwinkel) im drehenden System gegenüberstehen. Durch die Einführung je eines „virtuellen“ Blattes an jedem der Teilrotoren wird wieder eine vollständige kinematische Bestimmtheit erreicht, die beliebige Blattsteuerwinkel mit eindeutigen Taumelscheibenpositionen (kollektives und zyklisches Steuer) in Verbindung setzt.

Abbildung 6-65 zeigt die ausgewählten Positionen der jeweiligen „virtuellen“ Rotorblätter und die dadurch entstehenden, asymmetrischen 3-Blatt Teilrotoren, die zur Errechnung der Steuersignale genutzt werden.

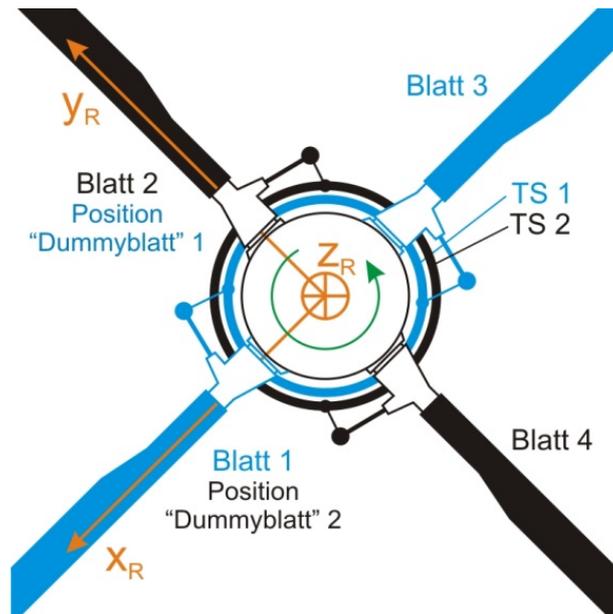


Abbildung 6-65: Anordnung der virtuellen Blätter am 4-Blatt Modellrotor der META

Die so genannten Dummy-Blätter liegen jeweils um 90° versetzt zu den bestehenden realen Blättern. Die Steuersignale der Dummy-Blätter sind beliebig wählbar und bilden den zur vollständig kinematischen Bestimmtheit notwendigen dritten Freiheitsgrad im drehenden System. Durch passende Wahl des Steuersignals für ein Dummyblatt ist es möglich, trotz der bestehenden asymmetrischen Verteilung der Blätter (die dem klassischen HHC-Ansatz entgegensteht), $3/rev$ -Signale im drehenden System mit Aktuatorbewegungen der Frequenz $2/rev$ im stehenden System zu erzeugen. Hierzu wird das rein durch die Phasenlage des virtuellen Blattes entstehende $3/rev$ -Steuersignal zusätzlich um 180° phasenverschoben. Am Beispiel der Taumelscheibe 1 (Blatt 1 und 3) ergeben sich die $3/rev$ -Steuerwinkel wie folgt:

- Blatt 1 (0°): $\vartheta_{3P,1} = A_3 \cdot \cos(3\psi - \varphi_{3P})$
- Dummyblatt (90°): $\vartheta_{3P,d} = A_3 \cdot \cos(3\psi - 90^\circ - \varphi_{3P} - 180^\circ)$
- Blatt 3 (180°): $\vartheta_{3P,3} = A_3 \cdot \cos(3\psi - 180^\circ - \varphi_{3P})$

Durch diese Umstellung in der Ansteuerung der META konnte die Belastung der Aktuatorssysteme und auch des restlichen Rotorversuchsstandes deutlich gesenkt werden, da die Aktuatorsignale zwar dieselbe Amplitude, jedoch nur die halbe Frequenz aufweisen, was die auftretenden Maximalbeschleunigungen um 75% reduziert.

Im Hinblick auf die Testmatrix für die Windkanalversuche, in der (in Anlehnung an die HART-II Kampagne) $3/rev$ -HHC-Versuche einen signifikanten Anteil der Testpunkte bilden, ist diese Maßnahme von großem Vorteil, da sie zur Verlängerung der Lebensdauer des Systems und zu einer Verringerung des Wartungsaufwandes beiträgt.

6.2.3 Erweiterung der META-Steuersoftware

Im Zuge der Vorbereitungen auf die Windkanalversuche wurde eine auf dem T-Matrix-Ansatz basierende HHC- bzw. Spurlaufregelung umgesetzt und in die META-Steuersoftware auf dem dSPACE-System des RVS integriert.

Der Regelalgorithmus stellt eine Erweiterung des bekannten T-Matrix-Ansatzes zur Vibrationsregelung gemäß einem Konferenzbeitrag vom European Rotorcraft Forum 2014 dar [12] und basiert auf dem Ansatz des „linear quadratic programming“ [13]. Dabei wird das zur Vibrationsreduktion nötige HHC-Steuersignal bzw. dessen Koeffizienten nicht mehr in einem Einschrittverfahren, sondern mittels einer Optimierung errechnet.

Ein großer Vorteil gegenüber dem bisherigen T-Matrix-Verfahren liegt in der Berücksichtigung der Grenzkriterien für das einzusteuern Signal und damit auch für die Aktuatorausschläge.

Beim klassischen T-Matrix Ansatz ist die Einhaltung dieser Grenzkriterien nur über eine nachträgliche Skalierung bzw. Kappung des Steuersignals oder durch gezieltes Abstimmen der Wichtungsmatrizen im Regelalgorithmus möglich. Eine nachträgliche Kappung bzw. Skalierung des Steuersignals erleichtert zwar das Einhalten der Grenzkriterien, reduziert die Effektivität des Reglers jedoch deutlich und kann z.T. sogar negative Auswirkungen bzgl. des Vibrationsniveaus haben. Im Gegensatz dazu stellt das Abstimmen der Wichtungsmatrizen nur ein implizites Verfahren zur Einhaltung der Grenzwerte dar und muss überdies für jede Testbedingung neu erfolgen, um einen sicheren Betrieb sicherzustellen.

Der nun realisierte Regelalgorithmus lässt eine direkte Definition der Grenzwerte zu, welche bei der Optimierung des einzusteuern Signals berücksichtigt wird. Die Grenzen werden dabei für jede einzusteuern HHC-Frequenz n/rev wie folgt definiert:

$$|\vartheta_{c,n}| + |\vartheta_{s,n}| \leq \gamma_n \quad \text{für } n = 2,3,4,5$$

Damit ist sichergestellt, dass die jeweilige Amplitude in dieser Steuerfrequenz den gesetzten Grenzwert nicht überschreitet. Die Grenzwerte können in der Benutzeroberfläche der Echtzeitsteuerung manuell und für jeden Optimierungszyklus neu eingestellt werden, so dass ein langsames Erhöhen der Reglerautorität möglich ist.

Die Identifikation der zur Regelung notwendigen T-Matrix wird mit einem rekursiven Verfahren [14] durchgeführt, was den Vorteil bietet, dass der Einsatz eines Kalman-Filters und die manuelle Einstellung der darin enthaltenen Parameter entfallen.

Der implementierte Regler kann sowohl für die Vibrationsreduktion mittels HHC, als auch zur In-Flight Spurlaufregelung zur Reduktion von Rotorunwuchten eingesetzt werden. Um ungewollte Einstellungen – z.B. im Falle einer Reglerfehlfunktion - auszuschließen, wurde die Regelung als semi-closed-loop ausgeführt. Nach Identifikation der T-Matrix kann der Regelalgorithmus manuell gestartet werden, die errechneten Steuerkoeffizienten werden anschließend in der GUI der Echtzeitsteuerung angezeigt. Erst durch aktives Eingreifen seitens des Bedieners werden die vom Regler vorgeschlagenen Werte in die META-Steuerung übernommen und entsprechende Steuersignale an die Aktuatoren geleitet. Neben der expliziten Formulierung und strengen Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte erhöht dieses Verfahren die Betriebssicherheit des Systems weiter.

6.2.3.1 Integration in das Steuersystem der META

Die Steuersoftware für die META wird aus einem MATLAB/Simulink-Modell in echtzeitfähigen Code übersetzt und läuft auf einem dedizierten Real-Time System der Firma dSPACE. Dabei stehen insgesamt vier Prozesskerne für die unterschiedlichen Aufgaben zur Verfügung, die wie folgt verteilt sind:

- Kern 1: Berechnung der IBC-Steuersignale und der korrespondierenden Aktuatorstellwege
- Kern 2: Positionsregelung der Hydraulikaktuatoren und Signalverteilung
- Kern 3: Dedizierter Kern für Netzwerk-Kommunikation

- Kern 4: Aufgaben mit niedriger Priorität

Während die Kerne 1 und 2 synchron zum Rotor mit einer Frequenz von $256/rev$ (4,48 kHz) betrieben werden, um die IBC-Steuerung selbst zu realisieren, können die Taktfrequenzen der Kerne 3 und 4 abhängig von der zugewiesenen Aufgabe beliebig festgelegt werden.

Um die HHC- und Spurlaufregelung von der sehr rechenintensiven Kernaufgabe der IBC-Steuerung zu trennen und Synchronisationsprobleme zu vermeiden, wurde der entsprechende Programmteil dem bisher gering belasteten Kern 4 zugewiesen, der mit einer Samplingrate (rotor-asynchron) von 2500 Hz betrieben wird.

Das für den Betrieb mit META modifizierte Simulink-Modell des Reglers lässt sich grob in drei Hauptaufgaben aufteilen: Signalverarbeitung, T-Matrix-Identifikation und den Regelalgorithmus selbst. [Abbildung 6-66](#) zeigt einen schematischen Aufbau des Reglermodells, wie es in die Steuer-Software der META integriert wurde.

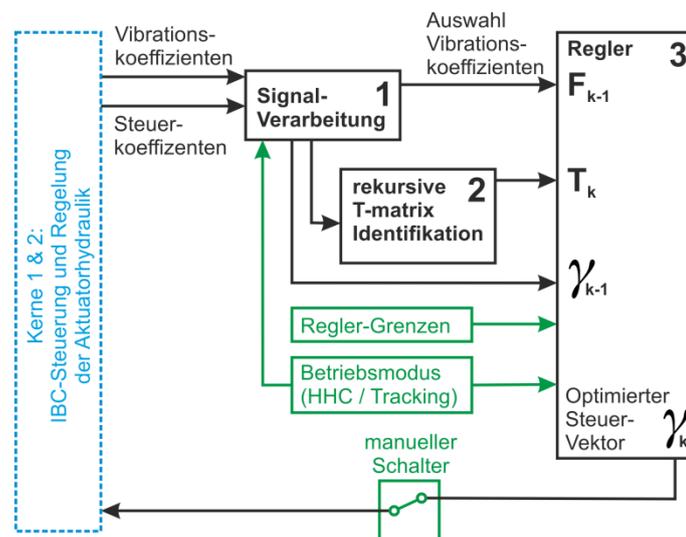


Abbildung 6-66: Schematischer Aufbau des Reglermodells

Um die notwendigen Eingangsdaten für den Regler zu generieren, werden die an der 6-Komponenten Rotorwaage des RVS gemessenen Signale zunächst auf Kern 2 mittels RHA frequenzanalysiert und die errechneten Koeffizienten an Kern 4 weitergeleitet. Abhängig von der Betriebsart (Vibrations- oder Spurlaufregelung) wird dann ein Vibrations-Eingangsvektor aus den Koeffizienten erstellt (F_{k-1}), der dann sowohl zur T-Matrix Identifikation auch als vom Regelalgorithmus genutzt wird. Gleichzeitig werden alle harmonischen Blattsteuer-Koeffizienten von Kern 1 an Kern 4 weitergeleitet und zum Steuer-Eingangsvektor γ_{k-1} zusammengefasst.

Die T-Matrix Identifikation erfolgt mit Hilfe eines rekursiven Identifikationsverfahrens, das in [14] näher erläutert wird. Um ein Abklingen der Transienten nach einer Änderung der dynamischen Steuer zu ermöglichen, wird ein Identifikationsschritt nur dann ausgelöst, wenn mindestens 1 Sekunde (oder 17,5 Rotorumdrehungen) seit der letzten Steuerungsänderung erfolgt ist, und sich die dynamische Antwort des Systems ausreichend stabilisiert hat. Der Identifikationsprozess läuft automatisch ab, - sobald ein Identifikationsschritt abgeschlossen ist, werden automatisch zufalls-generierte dynamische Steuersignale (innerhalb zuvor festgelegter Grenzen) erzeugt und ins System eingesteuert, worauf der Zyklus erneut beginnt. Ist die T-Matrix mit hinreichender Genauigkeit identifiziert, kann sie zur späteren Verwendung direkt abgespeichert werden.

Nach Identifikation der T-Matrix kann der eigentliche Regelalgorithmus aktiviert werden, der innerhalb der vom Nutzer festgelegten Grenzen ein zur Lastreduzierung optimiertes Steuersignal errechnet. Da der Algorithmus eine Optimierungsschleife enthält und damit bezüglich der Ausführungszeit nicht deterministisch ist, wurde das System so ausgelegt, dass zur Ausführung des Algorithmus

5 Sekunden (ca. 90 Rotorumdrehungen) zur Verfügung stehen. Damit stehen ausreichende Zeitreserven zur Errechnung der optimierten Steuerkoeffizienten zur Verfügung.

Ist ein Optimierungszyklus abgeschlossen, werden die vom Regler errechneten Steuerkoeffizienten in der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) der Steuerung angezeigt und können dann durch den Bediener manuell an das IBC-Steuerungssystem der META weitergeleitet und dort umgesetzt werden. Dieser semi-closed-loop Ansatz wurde gewählt, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Systems sicherzustellen. Auf diese Weise können alle Reglerergebnisse vor der Einsteuerung noch einmal manuell auf Konsistenz und Einhaltung der festgelegten Grenzen überprüft werden, bevor sie in hochdynamische Steuersignale für die Hardware umgesetzt werden.

6.2.3.2 Test der Spurlaufregelung

Ziel der Spurlaufregelung war die Reduktion der an der Rotorwaage auftretenden, umlaufenden $1/rev$ -Lasten während des Betriebs des Modellrotors im Schwebeflug. Als Eingangssignale für den Regler wurden die $1/rev$ -Komponenten der vier Kraftmessdosen in Z-Richtung an der Rotorwaage genutzt. Die einzelnen Sinus- und Cosinus-Komponenten der Signale werden zusätzlich in der GUI angezeigt und als so genannter „Imbalance-Plot“ visualisiert (siehe [Abbildung 6-67](#)) – bei einer gleichmäßig umlaufenden Unwucht spiegelt der Plot die geometrische Anordnung der vier Z-Kraftmessdosen an der Rotorwaage wieder.

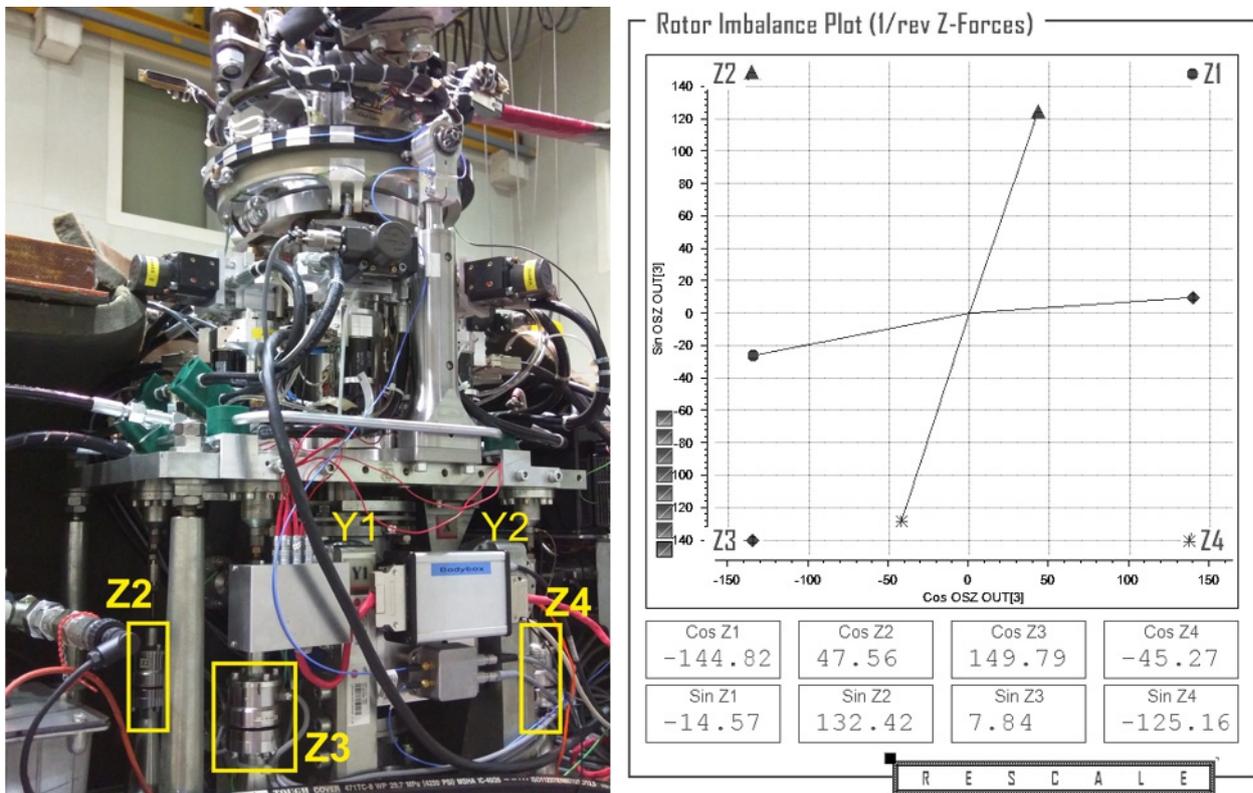


Abbildung 6-67: Rotorwaage mit Z-Kraftmessdosen (links), Imbalance-Plot der dSPACE GUI (rechts)

Für den Vorversuch in der Rotorhalle wurde der Bo105 Modellrotor für einen Schub von 2500N gewuchtet und ein (mechanischer) Spurlauf durchgeführt, um die umlaufenden $1/rev$ -Lasten für die Versuche zu reduzieren. Auf Grund von verbleibenden mechanischen und aerodynamischen Ungleichheiten zwischen den einzelnen Blätter ist das Ergebnis dieses track-and-balance Prozesses jedoch nur für den während dieses Prozesses eingestellten Schub ideal – verändert sich der Rotor-schub, steigen auch die umlaufenden Lasten.

Um für die Versuche mit dem Spurlaufregler ausreichend große Unwuchten zu erzeugen, wurde daher für die Versuche ein reduzierter Schub von 1500 N gewählt. Dabei zeigten die Kraftmessdosen der Rotorwaage $1/rev$ -Kraftkomponenten zwischen 128 N und 135 N an. Zur Identifikation

der T-Matrix wurden zunächst automatisch unterschiedliche, zufällig gewählte Blattwinkel Offsets von maximal 0.3° eingesteuert und die korrespondierenden dynamischen Antworten des Systems gemessen. Nach 10 Identifikationsschritten wurde die Identifikation abgeschlossen und die T-Matrix abgespeichert.

Anschließend wurde der Regelalgorithmus aktiviert und die Ergebnisse aus jedem Optimierungszyklus manuell übernommen und in das System eingesteuert. Nach vier Durchläufen des Reglers konnte so eine Reduktion der umlaufenden $1/rev$ -Lasten von 91,34% erreicht werden. Abbildung 6-68 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen $1/rev$ -Z-Lasten während des Versuchs. Die dargestellten Kreise markieren Messungen während der Identifikationsphase mit zufälligen Einsteuernungen, durch den Regler vorgeschlagene und anschließend eingesteuerte Spurlauf-Lösungen sind durch Dreiecke dargestellt.

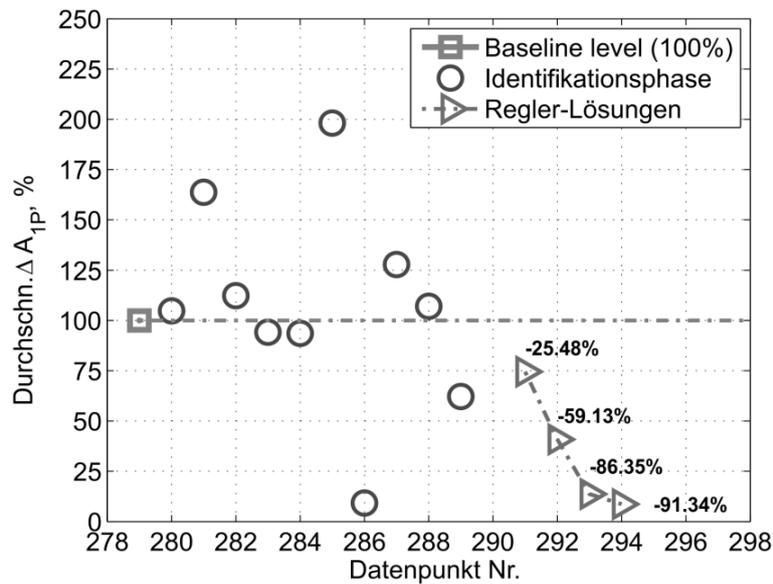


Abbildung 6-68: Entwicklung der durchschnittlichen $1/rev$ -Z-Kraft-Amplituden im Test

Die Blattwinkel-Offsets und die Z-Lasten für die letzte Reglerlösung (Datenpunkt 294) sind in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 dargestellt:

Tabelle 6-2: Blatt-Offsets

Blatt	Pitch-Offset [°]
1	+0,31°
2	+0,03°
3	-0,07°
4	+0,33°

Tabelle 6-3: Reduktion der $1/rev$ -Z-Kräfte

Z-Dose	$A_{1, \text{baseline}}$ [N]	ΔA_1 [N]	Reduktion [%]
1	131,9	-122,0	-92,5
2	134,0	-121,1	-90,4
3	135,0	-121,0	-89,6
4	128,1	-119,1	-93,0

Da der Regler eine Veränderung des Schubs nicht berücksichtigt, kam es durch die unterschiedlichen Blattoffsets zu einer Netto-Erhöhung des Rotorschubes um 115 N (7,7%). Da die auftretende Rotorunwucht unter anderem vom Rotorschub abhängt, kann eine Schubänderung das Ergebnis sowohl positiv, als auch negativ verfälschen.

Aus diesem Grund wurde eine feed-forward Schubanpassung in das Steuerungsmodell integriert, die das Gesamtkollektiv am Rotor um ein Viertel der Summe der einzelnen Blatt-Offsets verringert, um so den Schub nahezu konstant zu halten. Nach Integration der Schubanpassung wurde ein weiterer Versuch bei 1500 N Schub durchgeführt, um die Wirksamkeit des Reglers und der Schubanpassung selbst nochmal zu überprüfen. Dabei konnte nach nur drei Reglerzyklen eine Reduktion der $1/rev$ -Z-Kräfte um 94,2% erreicht werden, der Rotorschub blieb mit einer Abweichung von weniger als 1% praktisch konstant.

6.2.3.3 Test der HHC-Vibrationsregelung

Ziel der Versuche zur HHC-Vibrationsregelung war die Reduktion der $4/rev$ -Anteile der am Rotor auftretenden Vibrationen. Als Zielgrößen für den Regler wurden hier die Kräfte F_x , F_y und F_z sowie das Rollmoment M_x ausgewählt. Als Steuergrößen standen dem Regler die Sinus- und Cosinuskoefizienten der HHC-Steuer von $2 - 5/rev$ zur Verfügung.

Nach Trimmung des Rotors im Schwebeflug bei einem Schub von 2500 N wurde – analog zu den Versuchen zum Spurlaufregler – zunächst die automatisierte Identifikation der T-Matrix durch zufälliges Einsteuern von dynamischen $2 - 5/rev$ -Signalen mit einer maximalen Amplitude von $0,2^\circ$ gestartet. Während sowohl der Identifikations- als auch der Regleralgorithmus selbst korrekt arbeiteten, konnten jedoch keine eindeutigen Ergebnisse bezüglich der Reduktion der ausgewählten $4/rev$ -Lasten erzeugt werden.

Hierfür wurden zwei Hauptgründe identifiziert, die beide eine Folge der am Rotorversuchsstand herrschenden Testumgebung sind, und den Test negativ beeinflusst haben. Auf Grund des Tests innerhalb eines geschlossenen Raumes bei einem Schub von 2500 N ergaben sich aerodynamische Rezirkulationseffekte und somit dynamische Lasten an den Rotorblättern, die eine zur erfolgreichen Identifikation der T-Matrix notwendige Stabilisierung der $4/rev$ -Lasten verhinderten. Somit stand dem Regler nur eine sehr ungenau identifizierte bzw. teilweise zufällig besetzte T-Matrix zur Verfügung und es konnten keine signifikanten Lastreduktionen erzielt werden. Ein Versuch bei weiter reduziertem Schub (und somit weniger starker Turbulenz in der Rotorhalle) war nicht praktikabel, da in diesem Fall die gemessenen $4/rev$ -Lasten insgesamt zu gering waren, um einen sinnvollen Einsatz des Reglers zu ermöglichen.

Ein weiterer Grund für die nicht zufriedenstellenden Ergebnisse waren elektromagnetische Störungen in den Messsignalen, die vom Betrieb leistungsstarker Aggregate (wie z.B. hydraulischer Pumpmotoren) in unmittelbarer Nähe der Messanlage herrührten. Während diese mit einer Frequenz von 50 Hz auftretenden Signalstörungen die Messung von $1/rev$ -Signalen (17,5 Hz) wenig beeinflussen, werden Messsignale mit einer Frequenz von $4/rev$ (70 Hz) bereits negativ beeinflusst.

Da die hier identifizierten Hauptgründe für die Ergebnisse der Tests der Vibrationsregelung in direktem Zusammenhang zur Testumgebung der Rotorhalle und den dort vorherrschenden Bedingungen stehen, und der Vibrationsregler mathematisch identisch zum erfolgreich getesteten Spurlaufregler ist, wurde davon ausgegangen, dass in Windkanalversuch ein erfolgreicher Betrieb des Vibrationsreglers möglich sein sollte.

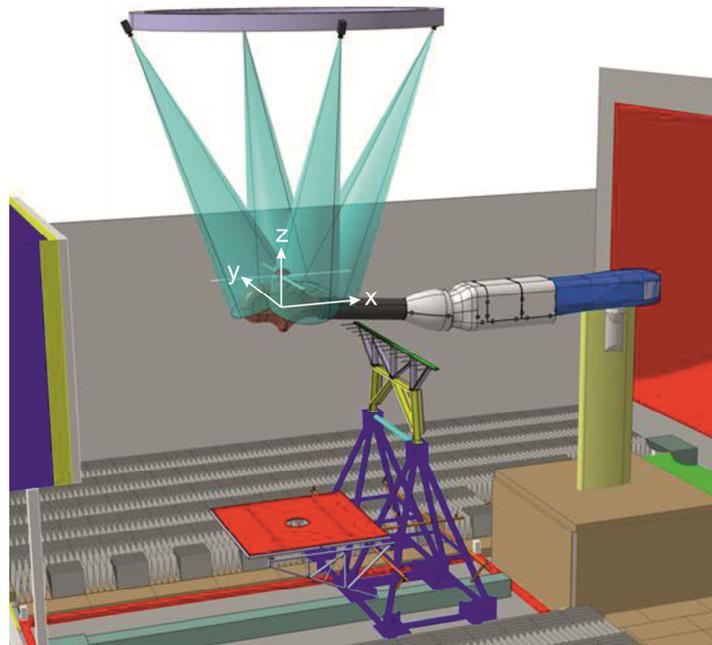
6.3 Arbeitspaket AP3.3.3: Erprobung im Windkanal LLF des DNW

Nach Abschluss sämtlicher Vorbereitungen aus den Arbeitspaketen AP 3.3.1 und AP3.3.2 und dem erfolgreichen Test von Hard- und Software unter Schwebeflugbedingungen in der Rotorhalle des DLR, wurde das Gesamtsystem wieder grob in seine Einzelteile zerlegt, verpackt und zusammen mit dem Messcontainer und den Hydraulikaggregaten zum Betrieb des Rotors und der META zum DNW-LLF in die Niederlande verbracht.

Dort angekommen wurde das Gesamtsystem zuerst in der Experimentierhalle des DNW wieder aufgebaut und im Zeitraum von 3 Wochen wieder in Betrieb genommen und auf seine vollständige Funktionsfähigkeit überprüft. Durch den Umzug des RVS und die teilweise Integration in die Systeme des DNW treten bei einem solch komplexen System erfahrungsgemäß ständig neue Herausforderungen zu Tage, die in kürzester Zeit vor dem eigentlichen Test in der Messtrecke behoben werden müssen. Im vorliegenden Fall gab es z.B. Probleme mit Netzteilen von Rechner und ganzen Messsystemen, die in Braunschweig über Jahre hinweg einwandfrei im Dauerbetrieb funktionierten, im DNW allerdings versagten oder nur sehr störanfällig liefen. Auch traten kleiner Probleme mit Einzelsensoren und Systemen der Ansteuerung der META auf, die allesamt behoben werden konnten. Insgesamt traten allerdings keine schwerwiegenden Probleme auf, welche die Windkanalmesskampagne hätten gefährden können, so dass diese planmäßig durchgeführt werden konnte.

6.3.1 Aufbau im DNW

Das mit einer 6-Achs Rotorwaage und einer Drehmomentenmesswelle ausgerüstete Modell des Rotorversuchsstands wurde für die Versuche an einen mit akustischem Schaum verkleideten Sting (grau) geschraubt und in der offenen 8m x 6m großen Teststrecke des DNW-LLF mit dem Rotor in einer Höhe von 1m oberhalb der Mittellinie des Kanals positioniert (s. [Abbildung 6-69](#)).



[Abbildung 6-69](#): CAD Zeichnung des Aufbaus des FTK-META-WK Versuchs im DNW-LLF

Die Höhe und Lage des Rotors wurde mit Hilfe des hydraulisch angetriebenen „Torpedos“ (blau) vom DNW eingestellt, wobei für die Versuche der Roll- und der Gierwinkel zu Null gesetzt wurden während der Rotoranstellwinkel im Bereich zwischen $-9,6^\circ$ und $+8,0^\circ$ variiert wurde.

Der Steuercontainer des DLR zur Pilotierung des Modells und der META-Experimente wurde in der Vorhalle außerhalb der Messtrecke positioniert und über entsprechend lange Kabel über den Torpedo mit dem Modell verbunden. Die Hydraulikaggregate wurden sowohl in der Experimentierhalle als auch außerhalb des DNW platziert. Die hydraulische Versorgung des Modells erfolgte via

Schläuchen ebenfalls über den Torpedo. Während der Versuche bestand permanenter Funkkontakt mit den den Windkanal betreibenden Personal des DNW.

6.3.2 Messequipment des DNW

Abbildung 6-69 zeigt außerdem Teile der vom DNW während der Tests betriebenen und zur Verfügung gestellten Instrumentierung. Über dem Rotor befinden sich direkt unter der Hallendecke der Messstrecke an einer ringförmigen Vorrichtung vier Hochgeschwindigkeitskameras zur optischen Erfassung der Bewegungen und Deformationen der einzelnen Rotorblätter via Stereo Pattern Recognition (SPR). Unter dem Rotor befindet sich akustisches Messequipment bestehend aus einem Mikrofonflügel (grün, direkt unter dem Sting) und einem Mikrofon-Array (rot).

6.3.2.1 Akustisches Messequipment

Die Akustikmessungen wurden mit zwei verschiedenen Systemen durchgeführt. Zum einen mit Hilfe eines mit Mikrofonen ausgerüsteten Profils, das unterhalb des Rotors innerhalb der Strömung entlang des Windkanalmodells bewegt werden kann, und zum anderen mit einem aus vielen Einzelmikrofonen bestehenden Mikrofon-Array, welches unterhalb des Rotors außerhalb der Strömung platziert wurde.

Der mit den Mikrofonen ausgerüstete Flügel wurde auf einer am Boden stehenden, in Strömungsrichtung verfahrbaren Traverse montiert. Mit diesem System ist es möglich Lärmteppiche des Rotors mit einer Auflösung von 0,5m in longitudinale und laterale Richtung aufzunehmen. Die Lärmteppiche geben Auskunft darüber, wie und in welcher Quantität ein mit Hilfe der META eingesteuertes aktives Steuer die Lärmabstrahlung in Richtung Boden verändert.

Das Design des Mikrofonflügels wurde im Vorfeld der Windkanalversuche vom DNW derart verändert, dass zum einen die eigene aeroakustische Signatur möglichst klein und zum anderen die aerodynamische Interferenz mit dem Rotor minimal ist. In früheren Tests (z.B. HART) wurde eine messbare aerodynamische Interferenz mit dem alten Mikrofonflügel beobachtet, wenn sich der Flügel direkt unterhalb des Rotors befand. Als Konsequenz ist der neue Flügel erheblich kleiner. Um die aerodynamische Interferenz weitestgehend auszuschließen wurde zusätzlich auf die akustische Verkleidung des Flügels mit Schaumstoff verzichtet. Trotz Weglassens des Schaumes wurden keine störenden akustischen Reflexionen während der Tests gemessen.

Das Mikrofon-Array ist ausgerüstet mit 140 Fernfeld-Mikrofonen, die in konzentrischen Kreisen mit einem maximalen Durchmesser von 4 m arrangiert sind. Das Array ist ebenfalls an der Traverse aber außerhalb der Strömung montiert. Mit Hilfe des Arrays können Lärmquellen detektiert werden und vereinfacht gesagt generelle Aussagen darüber getroffen werden, ob ein Versuchspunkt lauter oder leiser ist.

Alle akustischen Messungen wurden mit Hilfe von vier synchronisierten 48-Kanal 16bit VIPER Messdatenerfassungsanlagen des DNW aufgezeichnet und die Daten offline analysiert.

6.3.2.2 Optische Vermessung der Blattdeformationen

Der FTK-META-WK-Versuch im DNW war der erste Windkanaltest, bei dem der DNW sein verbessertes Stereo Pattern Recognition (SPR) System einsetzen konnte. Das SPR System des DNW wurde zur exakten optischen Lokalisierung und Verfolgung von vordefinierten Punkten auf bewegten Objekten im Windkanal entwickelt. Hierfür werden fluoreszierende Marker an Punkten von Interesse (Blätter, Rotorkopf) angebracht die anschließend von den vier hochauflösenden Kameras detektiert werden können.

Sowohl die Bo105- als auch die FTK-Blätter wurden mit jeweils 16 Paaren von Markern an Blattvorder- und -hinterkante über das Blatt verteilt bestückt. Mit Hilfe dieser Marker werden die Deformationen in Schlag-, Schwenk- und Torsionsrichtung vermessen. Zusätzliche Marker entlang der Blattmittellinie, am Blatthals und am Rotorkopf dienen der Vermessung der globalen Bewegung und der Blattidentifikation. Abbildung 6-70 zeigt als Beispiel die Markerpositionen des FTK-Blattes.

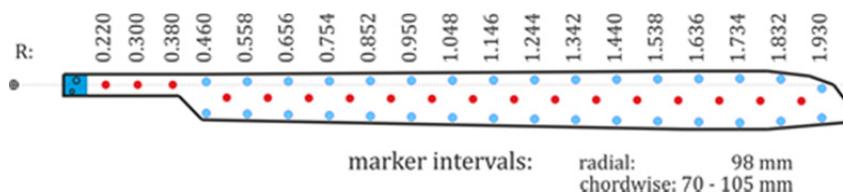


Abbildung 6-70: SPR-Markerpositionen am FTK-Blatt (blau: Vermessung, rot: zusätzlich)

Bevor mit dem System die Position der einzelnen Marker trianguliert werden kann, wurde das Messvolumen aufwändig kalibriert. Dabei wird ein Zusammenhang zwischen der dreidimensionalen Position eines Markers im Raum zu den zweidimensionalen Aufnahmen der Kameras geschaffen. Dafür wurde ein per Theodolite exakt vermessenes Gebilde aus an der Decke aufgehängten fluoreszierenden Kugeln verwendet.

Das Messvolumen wurde abgedeckt von vier PCO-2000 Kameras mit einer Auflösung von 2048 x 2048 Pixeln, die an der ringförmigen Vorrichtung von oben aus verschiedenen Richtungen auf den Rotor gerichtet waren (s. [Abbildung 6-69](#)). Prinzipiell reichen für das Verfahren zwei Kameras aus, allerdings kann mit vier Kameras eine größere Fläche abgedeckt und die Genauigkeit der Triangulation erhöht werden.

Um eine akkurate Messung des relativ schnell rotierenden Systems durchführen zu können, wurde das SPR System mit Hilfe von Pulsen aus dem drehenden System des Rotors getriggert. Um die Rotorbewegung für die Kamerabilder „einzufrieren“ wurde ein Festkörperlaser-Blitz mit einer Dauer von 10 ns verwendet, der in der Lage war, die Messstrecke in ausreichender Weise zu beleuchten. Ein Beispiel ist in [Abbildung 6-71](#) dargestellt.

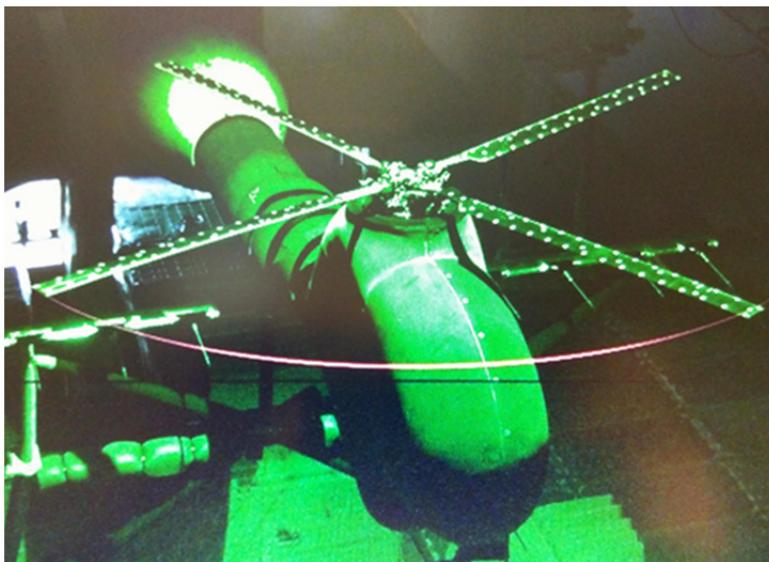


Abbildung 6-71: Modell und Messstrecke erleuchtet durch Laser-Blitz während SPR-Messung

Die Analyse zur Berechnung der Koordinaten der SPR-Messung ist relativ zeitaufwändig und wurde erst nach der Windkanalkampagne durchgeführt. Vor der Auslieferung der Daten wurden die Daten durch den DNW auf Konsistenz überprüft und auch kleinere Korrekturen vorgenommen. Während der Versuche wurden anhand ausgewählter Beispiele mit unkorrigierten Daten erste Cross-Checks durchgeführt.

6.3.3 Testprogramm

Die Testmatrix wurde in Absprache mit AHD definiert. Gemeinsam mit dem DNW wurde daraus ein Testprogramm entwickelt, das im DNW-LLF erprobt wurde. Für jeden Versuch, bestehend aus mehreren Datenpunkten, wurden vom DLR Runsheets geschrieben, die dem den Windkanal betreibenden Personal des DNW vor den Versuchen zur Verfügung gestellt wurden. Die Prioritäten auf der Liste der Testmatrix legte das DLR in Absprache mit AHD fest.

Neben einigen Hover-Testfällen wurden die Tests im Windkanal bei drei verschiedenen getrimmten Flugzuständen mit unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten, Schüben (C_T), simulierten Sinkwinkeln (γ) und Rotoranstellwinkeln (α_S) durchgeführt. Tabelle 6-4 gibt einen Überblick über die im Windkanalversuch untersuchten Flugzustände.

Tabelle 6-4: Überblick der getrimmten Flugzustände im WK-Versuch

Zustand	V_∞ , m/s	$100 \cdot C_T$	γ	α_S
Landeanflug	33	0.480	7.0°	+6.1°
Reiseflug	66	0.484	0.0°	-6.9°
Hochgeschwindigkeitsflug	76	0.486	0.0°	-9.2°

Mit wenigen Ausnahmen, die aus Zeitgründen und/oder wegen niedrigerer Priorität entfallen mussten, wurden alle Test-Punkte mit beiden Blattsätzen durchgeführt. Tabelle 6-5 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messpunkte der Testmatrix.

Tabelle 6-5: Überblick der getrimmten Flugzustände im WK-Versuch

Zustand	V_∞ , m/s	Bo105	FTK
Widerstandsmessungen	33-76	N/A	N/A
RPM-sweeps	0	✓	✓
Schubpolare	0	✓	✓
α_S -sweeps für max. BVI	33	✓	✓
2/rev sweeps @ 3 amps	33-76	✓	✓
3/rev sweeps @ 3 amps	33-76	✓	✓
4/rev sweeps @ 3 amps	33	✓	
4/rev sweeps @ 3 amps	66 & 76		✓
Individual blade tracking	33	✓	✓
TPP 0/rev @ 7 amps	33	✓	
TPP 0/rev @ 5 amps	33		✓
TPP 1/rev @ 3 amps	33	✓	✓
Non-harmonic control	76		✓

Das Ziel der Tests variierte mit den untersuchten Flugzuständen. Die Vermessung der Schubpolaren dient der Ermittlung der Schwebeflugeffizienz bzw. des Leistungsgütegrades der verwendeten Rotoren bzw. Blattsätze. Bei den Landeanflügen lag der Fokus auf der Reduktion von BVI-Lärm durch verschiedene Anwendungen der aktiven Rotorsteuerung. Zusätzlich wurde bei diesem Zustand das individuelle Blade-Tracking zwecks Eliminierung bestehender Rotorunwuchten erprobt. Bei den Horizontalflug-Versuchen lag der Schwerpunkt auf der Vibrationsreduktion und für einige wenige Fälle auch bei der Reduktion des Leistungsbedarfs durch die aktive Rotorsteuerung.

Von den 9 Belegungstagen der Messstrecke werden 3 Tage für den Auf- und den Abbau sämtlichen Messequipments benötigt, so dass 6 Tage à 8 h reine Messzeit zur Verfügung standen. Während dieser Zeit wurden (abzüglich Zeiten in denen Reparaturen durchgeführt wurden) 36 h Messzeit aufgebaut („wind on“: 32 h), was einer bislang unerreichten Auslastung von 75% entspricht. 100% der Prio I und ein Großteil der Prio II-Testfälle konnten vermessen werden. Dabei wurden ca. 600 Einzelmessungen (Datenpunkte) durchgeführt.

6.4 Arbeitspaket AP3.3.4: Auswertung der Ergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten sind die wichtigsten Ergebnisse/Erkenntnisse aus der Windkanalmesskampagne zusammengefasst. Da die wichtigsten Ziele der Versuche die Verringerung des Lärms, der Vibrationen und des Leistungsbedarfs bei unterschiedlichen Flugzuständen durch aktive Rotorsteuerungsmaßnahmen waren sollen hier auch nur die wesentlichen Ergebnisse präsentiert werden. Weitere Ergebnisse finden sich in [5].

6.4.1 Leistungsbedarf

Die Effizienz eines Rotors, das heißt sein Vermögen, die eingebrachte Leistung in möglichst viel Schub umzuwandeln, wird durch den sog. Leistungsgütegrad FM (vom engl. Figure of Merit) beschrieben. Dieser ist als das Verhältnis von idealer Leistung (die nur die minimalen induzierten Verluste beinhaltet) zu tatsächlich benötigter Leistung (unter Einschluss aller sonstigen Verluste) definiert und ist damit eine dimensionslose Vergleichsgröße. FM wird unter Schwebeflugbedingungen ermittelt. Dafür wird die Schubpolare aufgezeichnet, d.h. der tatsächliche Leistungsbedarf wird in Stufen steigenden Schubes für beide Rotoren ermittelt und daraus FM berechnet. Der Schub wurde bei den Versuchen bis zu einem Maximum von 7000 N bzw. bis zum Erreichen einer maximal zulässigen Rotorunwucht (steigt mit dem Schub) erhöht. In Abbildung 6-72 ist ein qualitativer Vergleich der Leistungsgütegrade FM beider Rotoren (Bo105- & FTK-Blattsatz) dargestellt.

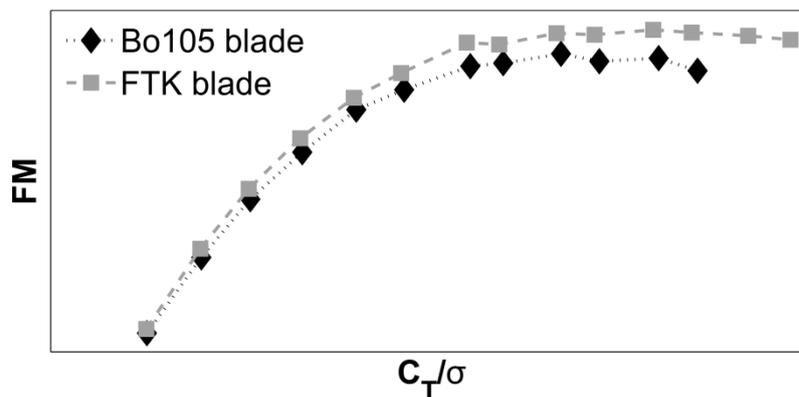


Abbildung 6-72: Vergleich des Leistungsgütegrades Bo105 und FTK-Rotor

Wie erwartet hat der FTK-Rotor aufgrund seines moderneren Blattdesigns und der neueren Blattprofile einen besseren Leistungsgütegrad. Beim maximal getesteten Schub des Bo105-Rotors benötigte der FTK-Rotor z.B. 6,3% weniger Leistung.

Der Leistungsbedarf im Vorwärtsflug lässt sich bei hohen Geschwindigkeiten sehr gut mit Hilfe von 2/rev HHC-Signalen reduzieren. Auch hier wurden beide Rotoren vermessen. Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der 2/rev Versuche mit beiden Rotoren bei 76 m/s dargestellt. Bei den Versuchen wurden 2/rev-Amplituden bis 1,5° eingesteuert, während die Steuerphasen von 0° bis 360° in unterschiedlicher Schrittweise verändert wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-73 dargestellt.

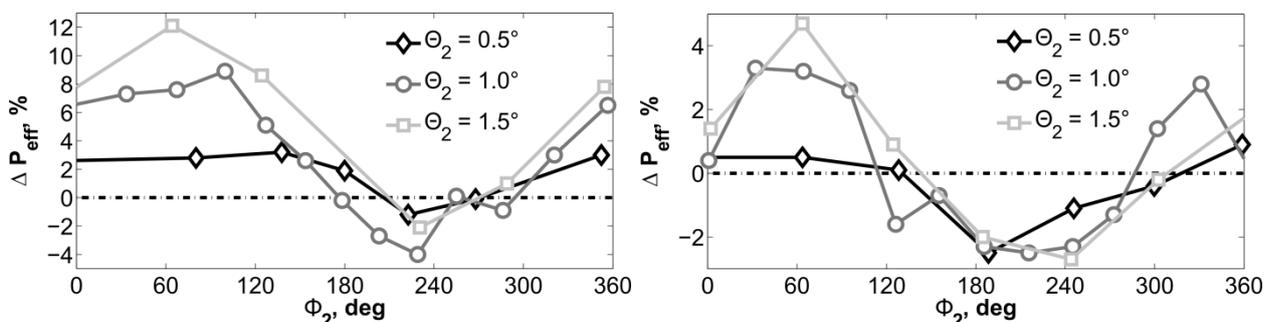


Abbildung 6-73: Veränderung des Rotorleistungsbedarfs durch 2/rev HHC bei 76 m/s für Bo105-Rotor (links) und FTK-Rotor (rechts)

Für beide Rotoren erkennt man eine annähernd sinusförmige Abhängigkeit der Veränderung des Leistungsbedarfs von der Steuerphase des 2/rev-Signals, wobei die Lage des Minimums nur wenig von der Amplitude des Signals abhängig ist. Wie zu erkennen, lässt sich beim Bo105 durch die 2/rev-Einsteuerung bei der gegebenen Fluggeschwindigkeit in etwa 4% Leistung einsparen, während das Einsparpotential beim FTK-Rotor mit besserem Leistungsgütegrad bei ca. 2,5% liegt. Der Vergleich beider Rotoren ohne aktive Rotorsteuerung ergab, dass der FTK-Rotor bei dieser Fluggeschwindigkeit ca. 28% weniger Leistung benötigte, als der Bo105-Rotor, was zeigt, dass hier insgesamt weniger Potential für Verbesserungen besteht.

Versuche mit nicht-harmonischen Steuersignalen zur Beeinflussung des Leistungsbedarfs wurden nur beim FTK-Rotor durchgeführt. In [Abbildung 6-74](#) ist links das Prinzip des eingesteuerten NHC-Steuersignals dargestellt und rechts die Veränderung des Leistungsbedarfs des FTK-Rotors bei fester Dip-Amplitude (0,75°) in Abhängigkeit der Dip-Phase bei 76 m/s dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass mit Hilfe dieses nicht-harmonischen Signals ebenfalls Einsparungen (hier 3%) des Rotorleistungsbedarfs erzielen lassen, die sogar etwas größer als bei den 2/rev-Versuchen lagen. Da für weitere Versuche mit mehr Amplituden leider keine Versuchszeit mehr zur Verfügung stand, ist unklar, ob hier ggf. noch mehr Potential besteht.

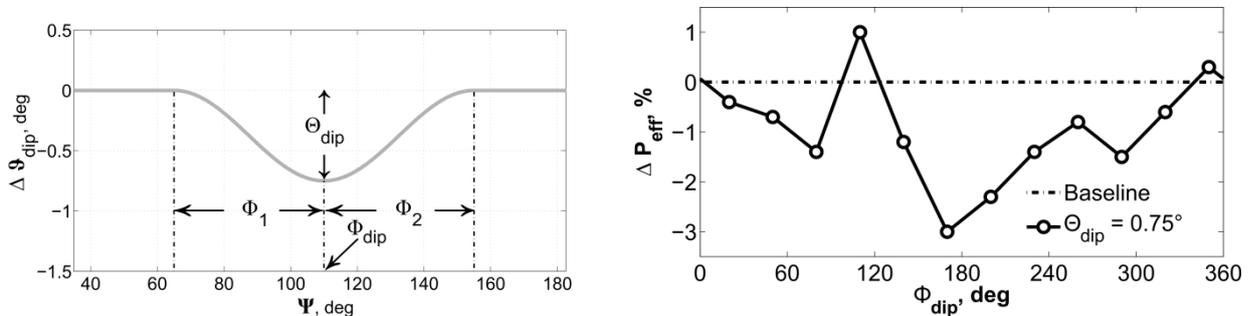


Abbildung 6-74: Prinzip der NHC-Steuerfunktion (links) und Veränderung des Rotorleistungsbedarfs durch diese Form des NHC bei 76 m/s für FTK-Rotor (rechts)

6.4.2 Vibrationen

Zur Beurteilung des Vibrationslevels des Modells wurde ein Vibrationsindex VI_4 definiert, der eine gewichtete Kombination der mit Hilfe einer virtuellen Masse (W_0) und dem Rotorradius (R) normierter 4/rev-Lasten (Kräfte F und Momente M) am Rotorkopf vereint. Dieser Index berechnet sich wie folgt:

$$VI_4 = \frac{1}{W_0} \sqrt{(0.5 \cdot F_{X,4})^2 + (0.67 \cdot F_{Y,4})^2 + F_{Z,4}^2} + \frac{1}{R \cdot W_0} \sqrt{M_{X,4}^2 + M_{Y,4}^2}$$

Schaut man sich die Baseline-Werte (ohne aktive Steuer) dieses Indexes ([Abbildung 6-75](#)) für die untersuchten Flugfälle an, erkennt man, dass der Bo105-Modellrotor im Landeanflug einen etwa 30% höheren Wert aufweist, als der FTK-Rotor, während dieses Verhältnis im Reiseflug genau anders herum ist. Im Hochgeschwindigkeitsflug zeigen beide Rotoren das gleiche Vibrationsniveau.

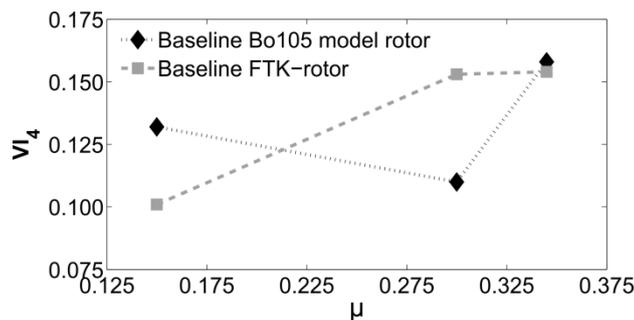


Abbildung 6-75: BL-Vergleich von VI_4 beider Rotoren bei allen untersuchten Flugzuständen

Zur Vibrationsreduktion wurden verschiedene Single-Frequenz n/rev HHC-Steuer untersucht. Für den Bo105 Rotor dienten die Versuche auch zum Abgleich mit den HART-Ergebnissen. Beim Bo105-Rotor ergab sich die größte Vibrationsreduktion im Landeanflug von ca. -77% erstaunlicherweise mit Hilfe eines 2/rev-Signals mit einer Amplitude von 1,5° (vgl. [Abbildung 6-76](#), links), während mit 3/rev „nur“ etwa -65% erreicht wurden (vgl. [Abbildung 6-76](#), rechts). Die beste 3/rev Amplitude ist mit 0,3° allerdings deutlich kleiner. Das gute 2/rev-Ergebnis ist insofern recht erstaunlich, da entsprechend der Mehrblattkoordinatentransformation bei einem 4-Blattrotor das 2/rev-Steuer eigentlich keinen direkten Durchgriff auf die 4/rev-Lasten hat. Der Einfluss kommt allerdings aus der Aerodynamik, da die vom Azimut periodisch abhängige Tangentialgeschwindigkeit am Blatt quadratisch in den Staudruck eingeht und bei der Berechnung des Auftriebes mit dem Anstellwinkel des Blattes multipliziert wird. Hierbei entstehen höherharmonische Anteile in allen Frequenzen.

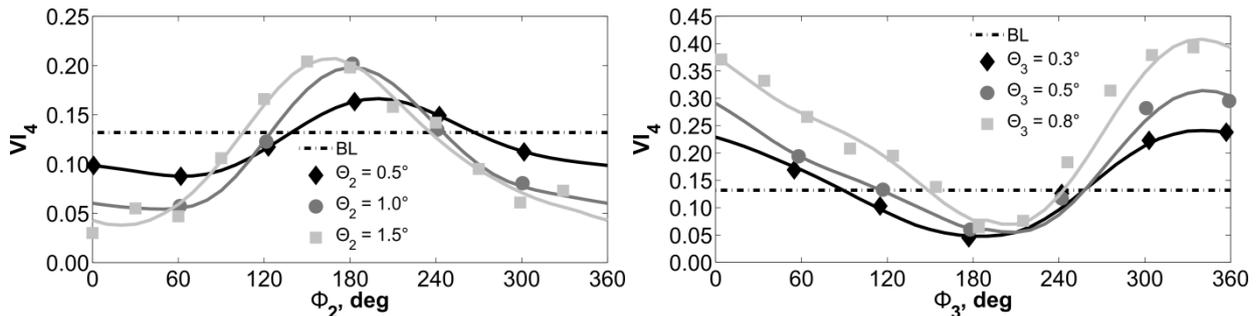


Abbildung 6-76: Einfluss von 2/rev (links) und 3/rev HHC auf den Vibrationsindex VI_4 für den Bo105-Rotor im Landeanflug, $\mu=0,15$

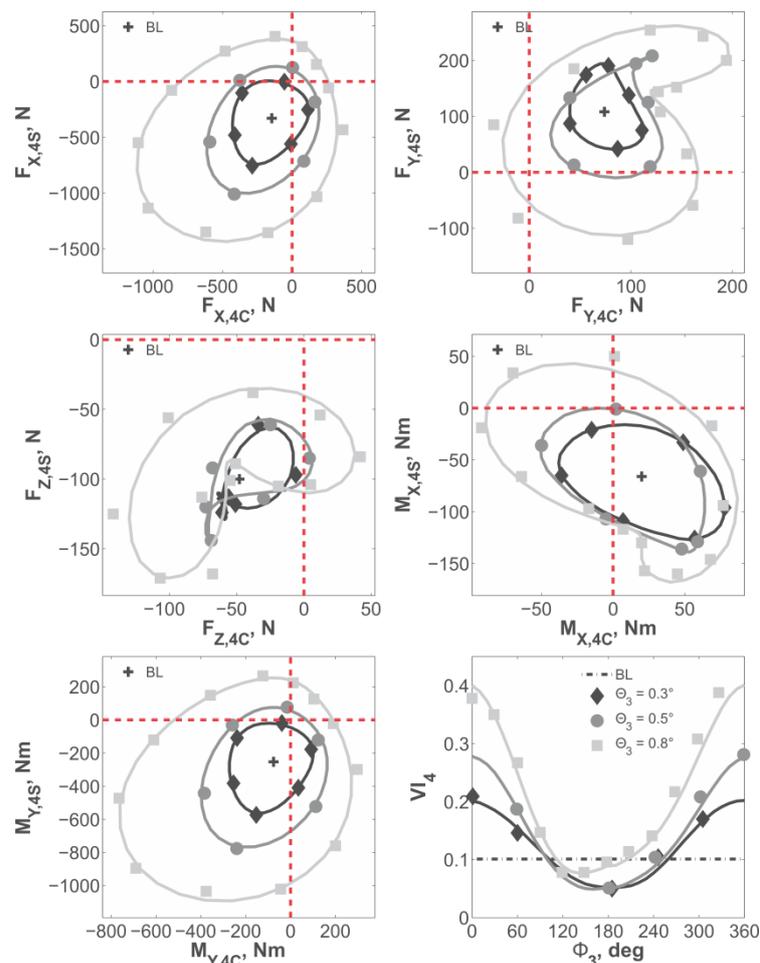
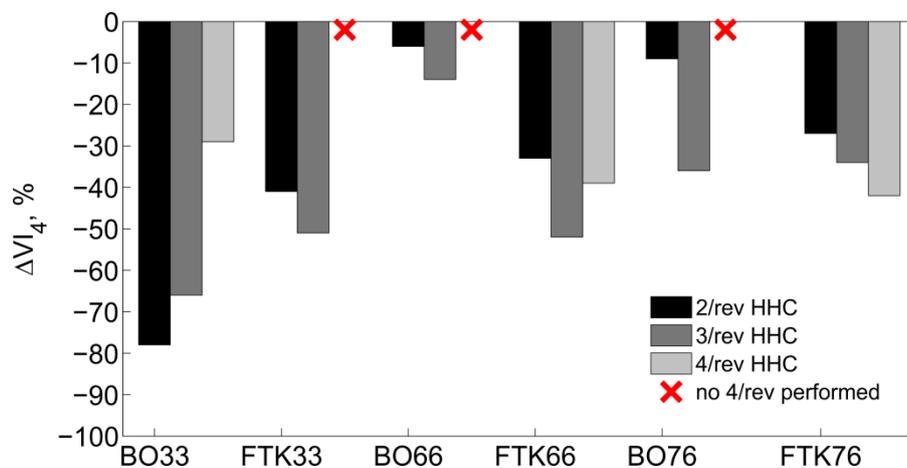


Abbildung 6-77: Einfluss von 3/rev HHC auf die Komponenten und den Vibrationsindex VI_4 selbst für den FTK-Rotor im Landeanflug, $\mu=0,15$

Beim FTK-Rotor konnte ebenfalls eine Reduktion des Vibrationsindex durch 2/rev-HHC nachgewiesen werden, diese ist aber in allen durchgeführten Untersuchungen kleiner als mit Hilfe eines reinen 3/rev-HHC-Steuers. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine explizite Darstellung des 2/rev Einflusses verzichtet. In [Abbildung 6-77](#) ist der Einfluss von 3/rev HHC auf die einzelnen Komponenten des Index sowie der Vibrationsindex selber für den FTK-Rotor im Landeanflug mit $\mu=0,15$ dargestellt. Während der Gesamtindex mit einem 3/rev Steuer um maximal etwa 50% reduziert werden kann, können die einzelnen in die Gleichung des Vibrationsindex eingehenden Komponenten bei unterschiedlichen Amplituden und Phasen vollständig eliminiert werden. Eine gleichzeitige Eliminierung aller Komponenten mit einer 3/rev Einsteuerung ist nicht möglich.

[Abbildung 6-78](#) fasst die in allen Versuchen erzielten maximalen Reduktionen für beide Rotoren auf einen Blick zusammen. Die Kennungen BO und FTK sind selbsterklärend, die Ziffern danach stehen für die Kennzeichnung des Flugzustandes bzw. der dabei eingestellten Anströmgeschwindigkeit in m/s. Da aus Zeitgründen nicht alle Versuchspunkte mit geringerer Priorität vermessen werden konnten, fehlen in der Zusammenstellung einige 4/rev-Ergebnisse.



[Abbildung 6-78](#): Maximale Vibrationsreduktionen durch Single-Frequenz HHC beider Rotoren

Im Ergebnis zeigte sich, dass sowohl für den Bo105- als auch für den FTK-Rotor deutliche Reduktionen des Vibrationsniveaus mittels Single-Frequenz-HHC möglich waren. Abhängig vom Rotormodell und dessen Designpunkt sind unterschiedlich starke Reduktionen möglich. Beim Bo105-Rotor z.B., der entsprechend [Abbildung 6-75](#) im Reiseflug bei 66 m/s ein schon relativ geringes Vibrationsniveau aufweist, sind daher auch nur geringe Verbesserungen zu erwarten gewesen, während beim FTK-Rotor verhältnismäßig gleiche Verbesserungen bei allen Versuchen erwartungsgemäß erzielt wurden. Sämtliche Bo105-Ergebnisse decken sich im Wesentlichen mit den Windkanal-Ergebnissen aus Full-Scale-Versuchen ([17], [18]). An dieser Stelle ist nochmals darauf hinzuweisen, dass bei sämtlichen Versuchen ausschließlich Single-Frequenz HHC eingesteuert wurde, bei der lediglich Amplitude und Phase der jeweiligen Frequenz modifiziert wurden. Mit Hilfe von Multi-Frequenz HHC Einsteuerungen und entsprechenden Optimierungen der Steuer sind erfahrungsgemäß weitere Verbesserungen im Hinblick auf das Vibrationsniveau zu erzielen. Diese waren allerdings aus Zeitgründen nicht Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen.

6.4.3 Lärm

Im Landeanflug kann es bei einer ungünstigen Kombination aus Sinkwinkel und Fluggeschwindigkeit dazu kommen, dass die an den Blättern im vorderen Bereich des Rotors erzeugten Blattspitzenwirbel infolge der Abwärtsbewegung des Hubschraubers im hinteren Teil des Rotors wieder in die Rotorkreisscheibe eintreten und dort mit nachfolgenden Blättern kollidieren. Bei dieser Blatt-Wirbel-Interaktion (engl. *blade vortex interaction*, BVI) kommt es zu fast sprungartigen hochfrequenten, starken Druckänderungen an den Blättern, die abhängig vom Auftrieb, dem Interaktionswinkel zwischen Wirbel und Blattlängsachse sowie dem vertikalen Abstand des Wirbels vom Blatt

mehr oder weniger laute impulsartige Lärmemissionen hervorrufen. Dieser BVI-Lärm lässt sich relativ gut mit Hilfe von 2/rev und 3/rev HHC beeinflussen.

Vor den HHC-Versuchen wurden bei 33 m/s sogenannte α_s -Sweeps mit beiden Blattsätzen ohne aktive Rotorsteuer durchgeführt, wobei der Rotoranstellwinkel α_s im Bereich zwischen $3,1^\circ$ und $8,1^\circ$ (Nase hoch) stufenweise verändert wurde. Diese Versuche dienen der schnellen Ermittlung des Baseline-Falls mit maximalem BVI, der als Startpunkt der Lärmreduktion durch aktive Rotorsteuerung dienen sollte. Aus dem Mikrofon-Array, das unterhalb des Rotors außerhalb der Strömung platziert wurde, können mit Hilfe der sogenannten klassischen Beamforming Auswertung sehr schnell Lärmquellen und deren Schweregrad ermittelt werden. Die Ergebnisse werden üblicherweise in Form von Lärm-Quell-Karten pro 1/3 Oktav-Band dargestellt. Zur Detektion der BVI-Lärmquellen der verwendeten Rotoren wird das 1/3 Oktav-Band um die Mittenfrequenz von 1250 Hz vermessen. Die Skalierung der Quell-Karten ist dabei proportional zum Wert des Schalldruckpegels innerhalb des entsprechenden 1/3 Oktav-Bandes. In Abbildung 6-79 sind die Lärm-Quell-Karten des jeweiligen Baseline-Falls ($\alpha_s = 6,1^\circ$) beider Rotoren (Bo105 links, FTK rechts) dargestellt.

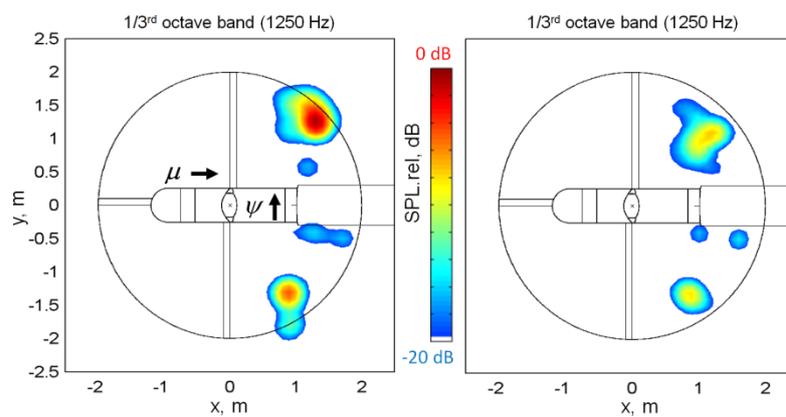


Abbildung 6-79: Lärm-Quell-Karten der Baseline-Fälle von Bo105- (links) und FTK-Rotor (rechts) beim Landeanflug mit max. BVI, $\alpha_s = 6,1^\circ$

Gut zu erkennen ist, dass der FTK-Rotor deutlich weniger BVI-Lärm verursacht, als der Bo105-Rotor und seine lautesten BVI-Quellen näher in Richtung Rotorzentrum liegen. Dies liegt im Wesentlichen an der Zuspitzung und der parabolischen Blattspitze der FTK-Blätter, wodurch das Auftreten von parallelem BVI in diesen Bereichen praktisch ausgeschlossen ist.

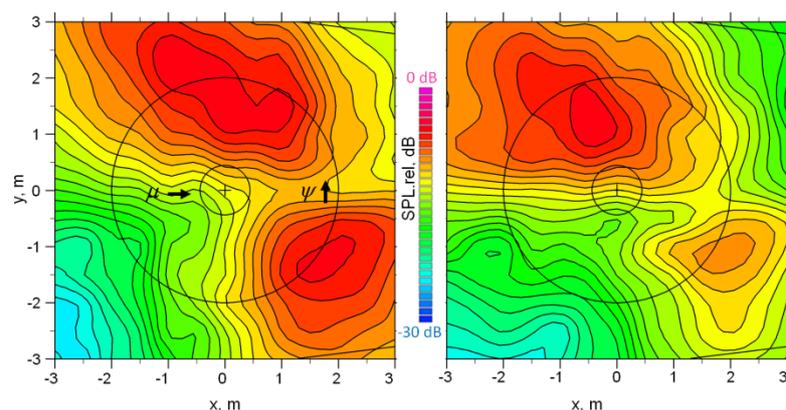


Abbildung 6-80: Lärmteppiche der Baseline-Fälle von Bo105- (links) und FTK-Rotor (rechts) beim Landeanflug mit max. BVI, $\alpha_s = 6,1^\circ$

Für beide Rotoren wurden dann mit Hilfe der unter dem Modell in Strömungsrichtung verfahrenen Mikrofon-Traversalen die kompletten Lärmteppiche dieser Zustände mit max. BVI-Lärm ermittelt (Abbildung 6-80). Wie von den Lärm-Quell-Karten erwartet, erkennt man den deutlich geringeren Schalldruckpegel des FTK-Blattes. Auf der vorlaufenden Seite des Rotors ist die Region des größten

Schalldruckes deutlich kleiner als beim Bo105-Rotor und auf der rücklaufenden Seite ist der Wert beim FTK-Blatt um ca. 4dB geringer als beim Bo105-Blatt. Gemittelt über alle Messpunkte der 6m x 6m großen Fläche ergibt das einen um 1,7dB geringeren Schalldruckpegel des FTK-Rotors.

Mit Hilfe von 2/rev und 3/rev HHC-Versuchen mit verschiedenen Amplituden und Phasen wurde der Einfluss auf den von den Rotoren abgestrahlten BVI-Lärm untersucht. Dabei zeigte sich, dass für den Bo105-Rotor die größte BVI-Reduktion (engl. minimum noise, MN) mit Hilfe eines 3/rev-HHC-Steuers mit einer Amplitude von $0,8^\circ$ und einer Phase von 90° erzielt wurde (geringfügig besser als mit Hilfe von 2/rev HHC aber Deckungsgleich mit Ergebnissen aus HART II), während dies beim FTK Rotor ein 2/rev-HHC-Steuer mit einer Amplitude von $1,0^\circ$ und einer Steuerphase von 0° der Fall war (vgl. [Abbildung 6-81](#)).

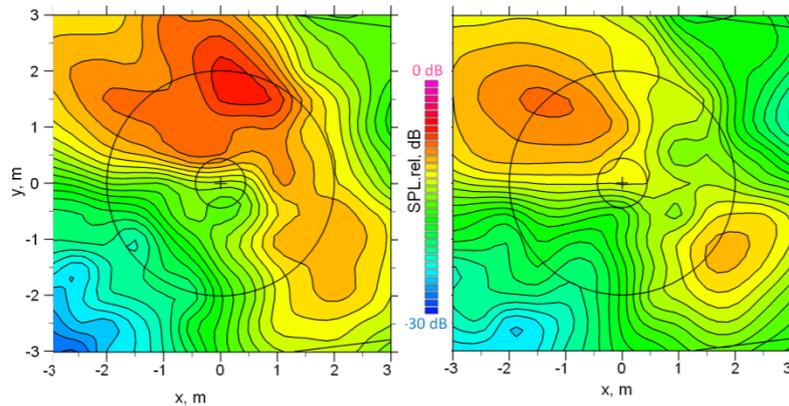


Abbildung 6-81: Lärmteppiche der MN-Fälle von Bo105- (links, 3/rev HHC, $0,8^\circ$ Amp., 90° Phase) und FTK-Rotor (rechts, 2/rev HHC, 1° Amp., 0° Phase) beim Landeanflug, $\alpha_s = 6,1^\circ$

Vergleicht man die Lärmteppiche mit den Baseline-Ergebnissen in [Abbildung 6-80](#), so erkennt man für den Bo105-Rotor (links) eine deutliche Reduktion des Lärms im vorlaufenden wie im rücklaufenden Bereich der Blätter. Die gemittelten Veränderungen im Schalldruckpegel belaufen sich an der vorlaufenden Seite auf etwa $-1,9\text{dB}$, während die Reduktion im rücklaufenden Bereich bei etwa $-4,5\text{dB}$ liegt. Die gemittelte Gesamtreduktion liegt bei $-2,7\text{dB}$.

Für das FTK-Blatt (rechts) ergibt sich im Vergleich zum Baseline-Fall lediglich an der vorlaufenden Seite eine klare Reduktion von $-3,5\text{dB}$. An der rücklaufenden Seite war der Lärm auch im Baseline-Fall schon relativ gering, so dass sich dort nur eine Reduktion von $1,2\text{dB}$ ergab. Die gemittelte Reduktion über die gesamte Messfläche ergab einen Wert von immerhin noch $-2,4\text{dB}$.

Als Ergebnis der Lärmuntersuchungen kann festgehalten werden, dass nicht nur der alte Bo105-Rotor mit seinen Rechteckblättern Potential zur Lärmreduktion durch aktive Rotorsteuerung bietet, sondern dass auch bei modernen vom Grundniveau her deutlich leiseren Rotorblättern, HHC zu einer signifikanten Lärminderung beitragen kann. Dies ist gerade im Hinblick auf die immer strenger werdenden Lärmvorschriften bei der Zertifizierung und den Betrieb von Hubschraubern vor allem über dicht bewohnten Gebieten von Relevanz.

6.4.4 SPR-Ergebnisse

Im vorliegenden Abschnitt werden an zwei ausgewählten Beispielen die Ergebnisse von SPR-Messungen präsentiert. Da geeignete Messsysteme zur direkten Messung der Blattdeformationen (Schlagen, Schwenken, Torsion) nicht existieren, bzw. nur relativ aufwändig und indirekt mittels z.B. über das Blatt verteilter DMS-Sensoren oder Fiber-Braggs, wo aus der Dehnung auf die entsprechende Auslenkung geschlossen wird, kommt das in mehreren Versuchen bereits bewährte optische SPR-Verfahren (siehe Abschnitt 6.3.2.2) zum Einsatz.

Einer der nachfolgend dargestellten Beispiele ist ein Versuch zum 1/rev Tip-Path-Plane Splitting, wo der Vierblattrotor mittels zyklischer Ansteuerung so in zwei Zweiblatt-Subrotoren aufgeteilt wurde, dass zwei getrennte Blattspitzenebenen entstehen. Sinn dieser Steuerform war der Versuch mit

diesem Verfahren eine abwechselnde Stärke der von der Blattspitze abgehenden Blattwirbel im vorderen Bereich des Rotors zu erreichen, die aufgrund der getrennten Blattspitzenebenen im Landeanflug vertikal gestaffelt auf die Rotorebene treffen und dort zu reduziertem BVI-Lärm führen sollen. Da mit Hilfe der 0/rev und 1/rev TPP zwar Lärmreduktionen erzielt wurden, die Ergebnisse aber deutlich unter den Erwartungen und den Erfolgen der 2/rev und 3/rev HHC lagen, wurde mit Hilfe der SPR-Analyse überprüft, ob eine Aufspreizung der Blattspitzenebenen stattgefunden hat und wenn ja wie groß diese im Versuch gelungen war.

In Abbildung 6-82 ist beispielhaft das Ergebnis der Schlagauslenkung aller vier einzeln vermessenen Blätter des FTK-Rotors für eine 1/rev TPP-Einsteuerung mit einer Steueramplitude von 1° und einer Steuerphase von 90° dargestellt. Bei dieser Einsteuerung erfahren die an der äußeren Taumelscheibe befestigten Blätter 1 und 3 bei 90° Azimut den maximalen Einstellwinkel des zusätzlichen 1/rev-Steuers, während die Blätter 2 und 4 an der inneren Taumelscheibe eine um 180° gedrehte Steuerphase im zusätzlichen Steuer erhalten und dadurch bei 270° ihren maximalen zusätzlichen Pitch bekommen. Da die Schlagantwort des gelenklosen Rotors auf ein 1/rev-Steuer in etwa 75° nach dem Pitch erfolgt, sollte die maximale Schlagauslenkung der Blätter 1 und 3 bei ungefähr 165° Azimut auftreten, während dies bei den Blättern 2 und 4 bei 345° der Fall sein sollte. Die Auswertung der SPR Messung bestätigt dies eindrucksvoll.

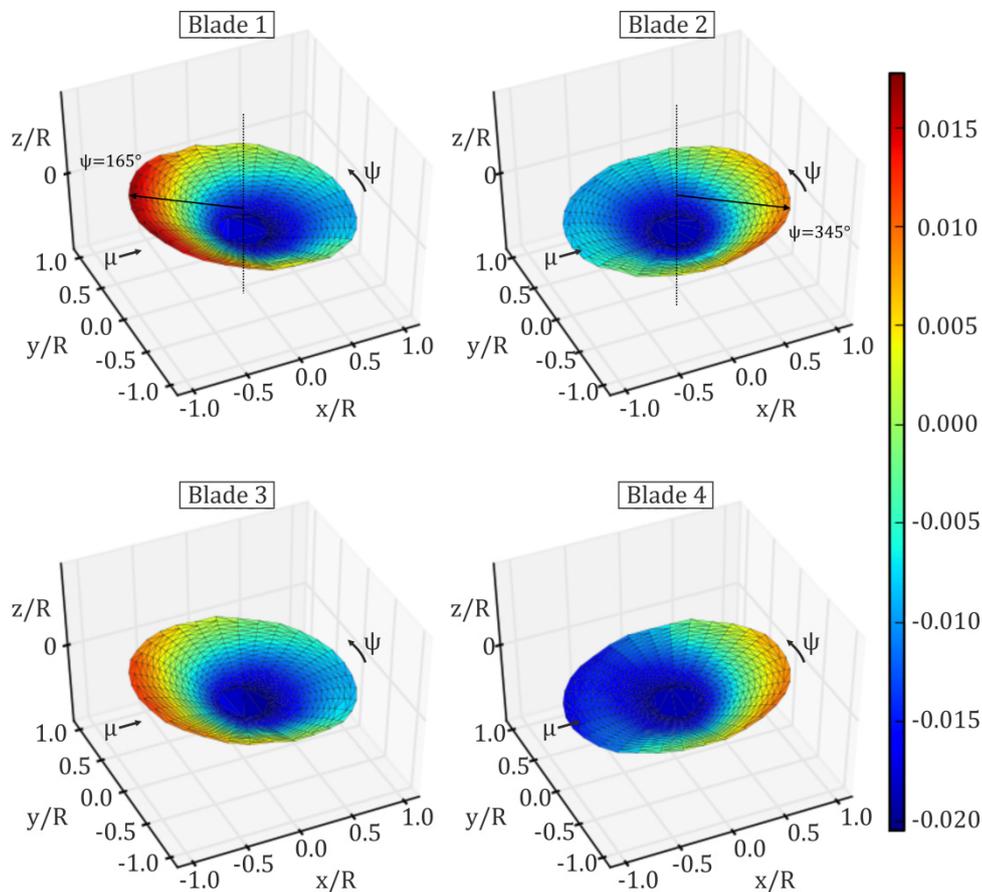


Abbildung 6-82: SPR Ergebnisse der Schlagauslenkung für 1/rev TPP-Splittings mit einer Amplitude von 1° und einer Steuerphase von 90° , FTK-Rotor

Betrachtet man die Differenz der Blattauslenkungen zwischen Maximum und Minimum, so kommt man auf einen Wert von $z/R = 0,02 \dots 0,025$ bzw. umgerechnet etwa 4-5 cm maximalen Abstand der Blattspitzenebenen. Für eine effektive vertikale Staffelung der Wirbel zum Zwecke der BVI-Lärmreduktion scheint dieser Abstand zu gering zu sein. Eine größere Staffelung erzielt man durch eine größere Spreizung der Blattspitzenebenen, was im Falle des gelenklosen 4-Blatt-Modellrotors allerdings kritische 2/rev Waagen-Lasten in Nicken und Rollen hervorrief und aus dem Grunde nicht weiter verfolgt wurde.

Das zweite Beispiel zeigt das SPR Ergebnis für einen 2/rev HHC Versuch mit dem FTK-Rotor (Abbildung 6-83). Dabei wurde mit einer Amplitude von $1,5^\circ$ und einer Steuerphase von 180° eingesteuert. Auch hier ist die Schlagauslenkung dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Minima und Maxima, die für alle Blätter an den gleichen Azimuten (um 0° und 180°) auftreten.

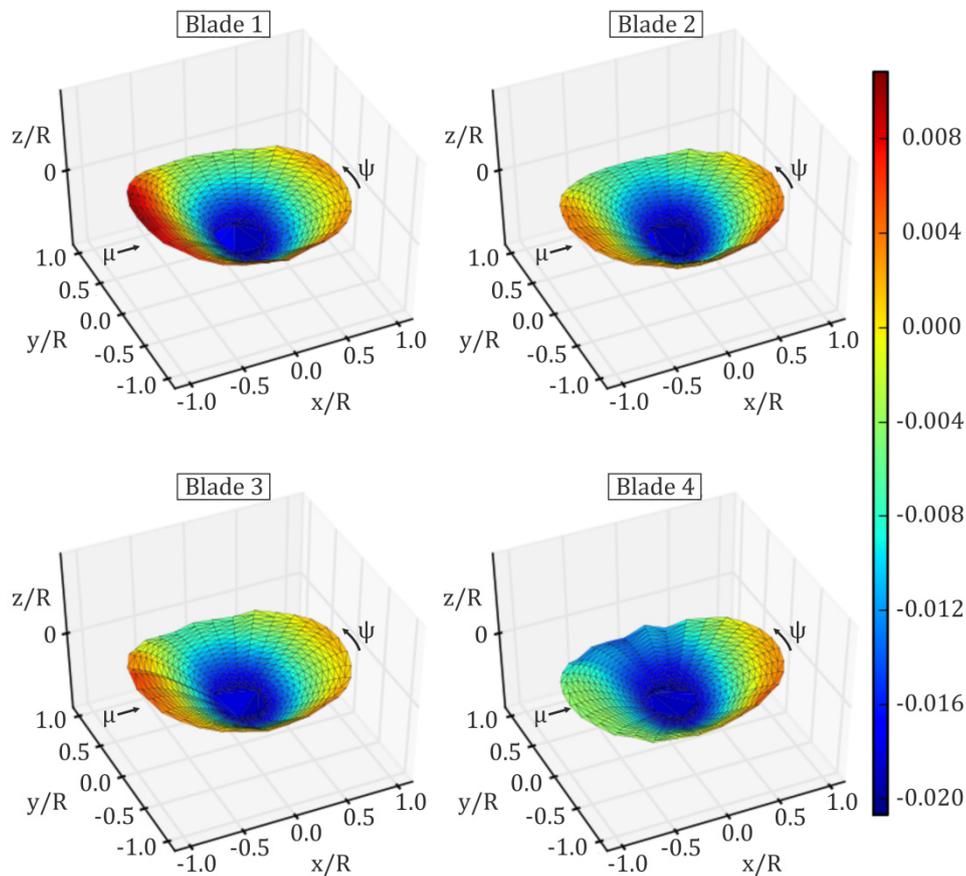


Abbildung 6-83: SPR Ergebnisse der Schlagauslenkung für 1/rev TPP-Splittings mit einer Amplitude von 1° und einer Steuerphase von 90° , FTK-Rotor

Die dargestellten SPR-Ergebnisse repräsentieren nur einen sehr kleinen Teil der im Versuch aufgenommenen SPR-Messpunkte. SPR-Messungen wurden an nahezu allen Versuchspunkten durchgeführt, von denen am Ende der WK-Kampagne in etwa 600 Datenpunkte zur Auswertung zur Verfügung stehen. Die Auswertung aller Messpunkte und die daraus zu gewinnenden Informationen werden das DLR auch weit über das Projektende hinaus beschäftigen.

7 Nutzen und Verwertbarkeit

Im März 2015 wurde wegen diverser Verzögerungen im Projekt und wegen einer hohen Auslastung des DNW und daher nur beschränkt zur Verfügung stehenden freien Zeitfenstern über den Projektträger ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung des Projektes zum Ende des Jahres 2015 gestellt und bewilligt. Mit Hilfe der gewährten Verlängerung des Projektes konnten der Windkanalversuch erfolgreich abgeschlossen und die anschließende Auswertung der Messergebnisse ebenfalls durchgeführt werden. Damit wurden alle wesentlichen anvisierten Ziele des Vorhabens erreicht.

Im August 2013 wurde gemeinsam mit AIRBUS HELICOPTERS Deutschland GmbH (AHD) im Rahmen des LuFo-V-1 Programmaufrufs ein weiteres Verbundvorhaben mit dem Titel „Skalierbarkeit und Risikominimierung von Technologie bei innovativem Design“ – kurz SKAT – initiiert und entsprechende Fördermittel beantragt. Im Teilprojekt „IBC-Untersuchungen am Fünfblattrotor mittels Mehrfachtaumelscheibe“ – kurz META5B – sollen durch das DLR weitere Forschungsarbeiten mit der META durchgeführt werden. Dabei soll das Potential der Übertragung von an 4-Blattrotoren erforschten IBC-Einsteuerungen zur Lärm-, Leistungs- und Vibrationsreduktion auf Rotoren mit 5 Blättern numerisch und auch experimentell im Windkanal untersucht werden. Hintergrund ist die bei AHD geplante Neuentwicklung von Helikoptermustern mit 5 Blättern (beispielsweise des X9) und die dafür erforderliche Skalierung und Übertragung bewährter Designmethoden und Vorgehensweisen für den Entwurf eines neuen Rotor systems. Das Projekt mit einer verkürzten Laufzeit von nur 33 Monaten startete am 01.07.2014 und endet voraussichtlich am 31.03.2017.

Durch die fortgeführte Kooperation wird AHD als Hubschrauberhersteller und führender Industriepartner auf dem Gebiet der aktiven Rotorsteuerung erheblich unterstützt und das DLR kann seine Position als Partner der Industrie weiter stärken. Die Durchführung von Windkanalversuchen ist eine konsequente Weiterführung der META-Aktivitäten des DLR zum Thema der aktiven Rotorsteuerung mittels Taumelscheibentechnologie, die im Projekt VAR-META entwickelt, in FTK-META-WK erstmals im Windkanal erprobt und in SKAT-META5B auf einen 5-Blattrotor mit unsymmetrischer Aufteilung der Steuerung der Blätter über die zwei Taumelscheiben der META übertragen und ebenfalls im Windkanal erprobt wird.

Der in META5B zu erbringende Nachweis der IBC-Fähigkeit der META für fünf Rotorblätter im Windkanal-Versuch ist für das DLR sehr wichtig, da so die Eignung der META als IBC-Testplattform für entsprechende Rotoren demonstriert und die Attraktivität des Systems für Dritte weiter entsprechend gesteigert werden kann. Das Herantreten von AHD an das DLR für die Durchführung von IBC-Tests im Rahmen von META5B zeigt den hohen Stellenwert des Rotorversuchsstandes und der Mehrfachtaumelscheibe als Versuchsplattform für die Industrie und ist das Resultat des erfolgreichen Projektabschlusses von VAR-META und FTK-META-WK und der dabei erzielten Ergebnisse.

Das DLR hat darüber hinaus durch die Demonstration der IBC-Fähigkeit des Rotorversuchsstandes für 5-Blatt Rotoren im WK-Versuch und durch die Ausschöpfung der DLR-Patente (Mehrfachtaumelscheibe 2008 [6], IBC-Steuerverfahren für die META 2013 [7]) eine eigene Verwertungsperspektive.

Der Vorsprung von Know-how und die wissenschaftlichen Erkenntnisse sichern dem DLR internationale Wettbewerbsfähigkeit und außerdem die Möglichkeit der Akquisition von Drittmittelprojekten für Modellmessungen mit den Rotorprüfständen insbesondere in EU-Forschungsprogrammen. Ferner schafft die Weiterverwendung des H145 Modellblattsatzes aus dem Projekt FTK-META-WK in der Windkanal-Kampagne von SKAT-META5B die Möglichkeit zum direkten Vergleich mit den in diesem Projekt geplanten Messungen an einem 4-Blatt Rotor.

8 Fortschritt bei anderen Stellen

Systeme zur aktiven Rotorsteuerung werden bei verschiedenen Forschungseinrichtungen und Unternehmen untersucht. Während im Rahmen von FTK-META-WK beim DLR-FT das META-System

für den Windkanalversuch vorbereitet und dann auch final dort erfolgreich zum Einsatz gebracht wurde, wurden bei AHD im gleichen Vorhaben die im LuFo-Programm INROS gestarteten Untersuchungen zur Realisierung einer Doppeltaumelscheibensteuerung (DTS) wieder aufgenommen und fortgeführt. Die Entwicklungsarbeiten an der DTS wurden durch die 2/rev Windkanalversuche mit der META flankiert und unterstützt. Ergebnisse dieser Aktivitäten sind in [16] zusammengefasst.

Das wesentliche Ziel der teilweise parallel gelaufenen Aktivitäten bei DLR-FT innerhalb der internationalen Kooperation in STAR (Smart-Twisting Active Rotor), war der Versuch einen aktiver Twist-Rotor unter Beteiligung von DLR, NASA/AFDD, Onera, DNW, JAXA, KARI und der Konkuk Universität im Windkanal DNW-LLF in Holland zu erproben. Die Technologie des vierblättrigen, Machzahl-skalierten und voll instrumentierten aktiven Verwindungsrotors wurde unter der Leitung von DLR-FA im Vorläufer-Projekt ACTOR (Active Twist Optimised Rotor) entwickelt, gebaut und zum Abschluss des Projektes in der Rotorhalle des DLR-FT getestet. Der Abschluss dieses Projektes war gleichzeitig der Beginn der STAR-Kooperation. Beim Test in Braunschweig zeigten die im ACTOR-Rotor verbauten Piezo-Folien-Aktuatoren unter Rotorbetriebslasten allerdings Probleme, die schlussendlich dazu führten, dass der Windkanalversuch abgesagt werden musste. Da das Problem eindeutig den verwendeten Aktuatoren zugeordnet werden konnte wurde beschlossen, einen optimierten Rotor mit verbesserter Aktuatorik aufzubauen und nach erfolgreicher Erprobung in Braunschweig einen neuen Windkanalversuch in STAR in 2017 oder 2018 anzuvisieren.

9 Veröffentlichungen, Vorträge

- [1] Küfmann, P., Bartels, R., Schneider, O.: DLR's Multiple Swashplate Control System: Operation and Preliminary Testing. 38th European Rotorcraft Forum, September 4-7, 2012, Amsterdam, Netherlands
- [2] Bartels, R., Küfmann, P., Schneider, O.: Operation and Preliminary Testing of the Multiple Swashplate Control System at DLR's Rotor Test Rig, 61. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 10.-12. September 2012, Berlin, Deutschland
- [3] Küfmann, P., Bartels, R., van der Wall, Berend G.: Localized Blade-Root IBC for Rotor-Performance Enhancement and Vibration Reduction, 40th European Rotorcraft Forum, September 1 -4, 2014, Southampton, UK
- [4] Küfmann, P., Brillante, C.: Implementation and Test of a semi-closed loop HHC-algorithm with the DLR's Multiple Swashplate System. 41st European Rotorcraft Forum, September 1-4, 2015, Munich, Germany
- [5] Küfmann, P., Bartels, R., van der Wall, Berend G., Schneider, O., Holthusen, H., Gomes, J., Postma, J.: The First Wind Tunnel Test of the DLR's Multiple Swashplate System: Test Procedure and Preliminary Results, AHS 72nd Annual Forum, May 17 -19, 2016, West-Palm-Beach, Florida, USA

10 Literaturliste

- [6] van der Wall, B. G., Bartels, R.: Hubschrauber- Rotorsteuereinrichtung, Patent-Nr. DE 10 2006 030 089, Deutsches Patent- und Markenamt, 2008
- [7] Küfmann, P.: Verfahren zum Ermitteln von Stellgrößen, Patent-Nr. DE 10 2010 024 089, Deutsches Patent- und Markenamt, 2013
- [8] Lunze, J.: Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen; Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 4. Auflage, Springer Verlag Hamburg, 2004
- [9] Roget, B., Chopra, I.: Wind Tunnel Testing of an Individual Blade Controller for a Dissimilar Rotor, Proceedings of the 60th AHS-Forum, 7.-10. June 2004, Baltimore
- [10] Splettstößer, W.R., Schultz, K.-J., Kube, R., Brooks, T.F., Booth, E.R., Niesl, G., Streby, O.: A Higher Harmonic Control Test in the DNW to Reduce Impulsive BVI Noise, Journal of the AHS, Bd. 39, Nr. 4, S. 3- 13, 1994.

- [11] Malovrh, B., Gandhi, F.: Localized Individual Blade Root Pitch Control for Helicopter Blade—Vortex Interaction Noise Reduction, *Journal of the American Helicopter Society*, Volume 55, Number 3, 1 July 2010 , pp. 32007-1-32007-12(12)
- [12] R. Morales et al.: Actuator Constraints Handling in Higher Harmonic Control Algorithms for Vibration Reduction, Presented at the 40th European Rotorcraft Forum, Southampton, UK, 2014
- [13] Reslow-Krüth, T.: Interior-Point Algorithms for Quadratic Programming, Master Thesis at the Technical University of Denmark, 2008
- [14] Patt, D. et al.: Higher-Harmonic-Control Algorithm for Helicopter Vibration Reduction Revisited, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 28, Issue 5, 2005
- [15] Bartels, R., Küfmann, P.: Abschlussbericht – Voll-aktive Rotorsteuerung - Mehrfachtaumelscheibe (VAR-META), Fkz. 20H0802C, DLR-IB 111-2013/17, DLR, Braunschweig, 26.03.2013
- [16] Krämer, P., Hahn, M., Grohmann, B., Beermann, D., König, H., Großkopf, D., Minciotti, M., Efron, A., Belschner, T., Bartels, R., Mainz, H., van de Kamp, B.: Schlussbericht FTK-DTS – Fortschrittliche Taumelscheibenkonzepte – Doppel-Taumelscheibe, Fkz 20H1105A, AIRBUS HELICOPTERS Deutschland GmbH, Donauwörth, 28.09.2015
- [17] Stephen A. Jacklin, Khanh Q. Nguyen, Achim Blaas, and Peter Richter. Full-Scale Wind Tunnel Test of a Helicopter Individual Blade Control System. *Proceedings of the 50th Annual Forum of the AHS*, May 11-13, 1994.
- [18] Stephen A Jacklin, Achim Blaas, Dietrich Teves, and Roland Kube. Reduction of Helicopter BVI Noise, Vibration and Power Consumption through Individual Blade Control. *Proceedings of the 51st Annual Forum of the AHS*, pages 662–680., May 9-11, 1995.

11 Liste der erstellten Dokumentation

- [19] Bartels, R., Küfmann, P.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.01.2012 - 30.06.2012, Braunschweig, 07.08.2012
- [20] Th. Reiser: Entwicklung und Umsetzung einer mikrocontrollerbasierten Positionsregelung für eine Mehrfachtaumelscheibe, Masterarbeit an der Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, Braunschweig, 08.10.2012.
- [21] Küfmann, P., Bartels, R.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.07.2012 - 31.12.2012, Braunschweig, 23.01.2013
- [22] Küfmann, P., Bartels, R., Mainz, H.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.01.2013 – 30.06.2013, Braunschweig, 08.08.2013
- [23] Küfmann, P., Bartels, R., Mainz, H., Schneider, O., Grigas, U.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.07.2013 – 31.12.2013, Braunschweig, 10.02.2014
- [24] Bartels, R., Schneider, O., Mainz, H., Przybilla, M., Grigas, U., Ehr, S., Brehl, E.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.01.2014 – 30.06.2014, Braunschweig, 08.08.2014
- [25] Bartels, R., Schneider, O., Mainz, H., Przybilla, M., Grigas, U., Henseleit-Wieser, S., Brehl, E.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.07.2014 – 31.12.2014, Braunschweig, 10.02.2015
- [26] Bartels, R., Küfmann, P., Schneider, O., Przybilla, M., Ehr, S.: DLR-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FTK-META-WK, Berichtszeitraum 01.01.2015 – 30.06.2015, Braunschweig, 07.08.2015