# DLR-IB-FT-BS-2023-85

DLR – COAX 2D Kalibrierbericht im Projekt MIND

**Interner Bericht** 

Daniel Müller, Oliver Schneider



Deutsches Zentrum DLR für Luft- und Raumfahrt Institutsbericht DLR-IB-FT-BS-2023-85

#### DLR – COAX 2D Kalibrierbericht im Projekt MIND

Daniel Müller, Oliver Schneider

Institut für Flugsystemtechnik Braunschweig

- 30 Seiten
- 33 Abbildungen
  - 9 Tabellen
  - 4 Referenzen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Flugsystemtechnik Abteilung Hubschrauber

Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich

Braunschweig, den 16.10.2023

Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleiter: M. Höfinger

Verfasser: D. Müller





# Dokumenteigenschaften

Titel	DLR – COAX 2D Kalibrierbericht im Projekt MIND
Betreff	DLR-COAX 2D, MIND
Institut	DLR-FT
Erstellt von	Daniel Müller, Oliver Schneider
Beteiligte	
Geprüft von	
Freigabe von	
Datum	16.10.2023
Version	1.0
Dateipfad	



# Inhaltsverzeichnis

Do	okumenteigenschaften	3
1.	Einleitung	5
2.	Messanlagen und Datenaufzeichnung	6
3.	Definitionen und Koordinatensysteme	7
4.	Kalibrierungen	9
	4.1. Winkel Kollektivhebel (COLL_A)	9
	4.2. Winkel Steuerhebel (ST_AX, ST_AY)	10
	4.3. Winkel Pedale (ST_AZ)	11
	4.4. Kraft Kollektivhebel (COLL_FZ)	12
	4.5. Kraft Steuerhebel (ST_FX, ST_FY)	12
	4.6. Kraft Pedale (PD_L_FX, PD_R_FX)	13
	4.7. Lasten am Heckausleger (TAIL_MX, TAIL_MY, TAIL_MZ)	15
5.	Zusammenfassung	17
6.	Literaturverzeichnis	18
6. 7.	Literaturverzeichnis	18 19
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A	18 19 
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.	
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.	
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.	
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.   7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ	
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.   7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ   7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX	<b>18 19</b> 191920202122
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.   7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ   7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX   7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY	18   19   19   19   20   20   21   22   23
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.   7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ   7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX   7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY   7.8. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX	18   19   19   19   20   20   21   22   23   24
6. 7.	Literaturverzeichnis.   Anhang   7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A   7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX.   7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY.   7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ.   7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ   7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX   7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY   7.8. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX.   7.9. Kalibrier-Protokoll PD_R_FX	18   19   19   19   20   20   20   21   22   23   24   25
6.	Literaturverzeichnis Anhang 7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A 7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX 7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY 7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ 7.5. Kalibrier-Protokoll ST_AZ 7.6. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ 7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FX 7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY 7.8. Kalibrier-Protokoll ST_FX 7.9. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX 7.10. Kalibrier-Protokoll TAIL_MX	18   19   19   19   20   20   21   22   23   24   25   26
6.	Literaturverzeichnis. Anhang 7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A 7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX. 7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY. 7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ. 7.5. Kalibrier-Protokoll ST_FZ. 7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX. 7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.8. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.9. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX. 7.10. Kalibrier-Protokoll TAIL_MX. 7.11. Kalibrier-Protokoll TAIL_MY.	18   19   19   19   20   20   20   21   22   23   24   25   26   27
6.	Literaturverzeichnis. Anhang 7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A 7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX. 7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY. 7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ. 7.5. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ 7.6. Kalibrier-Protokoll COLL_FZ 7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.8. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.9. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX. 7.10. Kalibrier-Protokoll PD_R_FX. 7.11. Kalibrier-Protokoll TAIL_MY. 7.12. Kalibrier-Protokoll TAIL_MZ.	18   19   19   19   20   20   20   21   22   23   24   25   26   27   28
6.	Literaturverzeichnis. Anhang 7.1. Kalibrier-Protokoll COLL_A 7.2. Kalibrier-Protokoll ST_AX. 7.3. Kalibrier-Protokoll ST_AY. 7.4. Kalibrier-Protokoll ST_AZ. 7.5. Kalibrier-Protokoll ST_FZ 7.6. Kalibrier-Protokoll ST_FX. 7.7. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.8. Kalibrier-Protokoll ST_FY. 7.9. Kalibrier-Protokoll PD_L_FX. 7.10. Kalibrier-Protokoll TAIL_MX. 7.11. Kalibrier-Protokoll TAIL_MY. 7.12. Kalibrier-Protokoll TAIL_MZ. 7.13. Finale Liste der verwendeten Basissensorik	18   19   19   19   20   20   20   20   20   20   20   20   20   21   22   23   24   25   26   27   28   29



# 1. Einleitung

Der Ultraleichthubschrauber CoAX 2D des DLR (Abbildung 1 COAX 2D des DLR ist mit einer Basismessanlage der Firma messWERK ausgestattet. Die Instrumentierung mit Dehnungsmesstreifen (DMS) sowie die Kalibrierung der Signale des drehenden Systems ist im Institutsbericht DLR-IB-FT-BS-2021-73 [1] beschrieben. Die Kalibrierung des stehenden Systems wird im Bericht DLR-IB-FT-BS-2022-2-S4 [2] beschrieben.

Im Rahmen des LuFo-Projekts MIND wurde der Datenrekorder (messRECHNER) der Basismessanlage durch einen Datenrekorder vom Typ MDR der Firma Safran Data Systems ersetzt. (Bis auf den Außentemperaturfühler (OAT) wurden alle Sensoren des stehenden Systems an den neuen Datenrekorder angeschlossen.) Hierdurch wurde die erneute Kalibrierung der analogen Sensorik im stehenden System notwendig. Dieses Dokument orientiert sich am Bericht DLR-IB-FT-BS-2022-2-S4 [2] und beschreibt die Durchführung und Auswertung der Kalibrierarbeiten, die im September 2022 beim DLR in Braunschweig stattfanden, welche durch den Tausch der Messanlagen notwendig wurden.

Im Einzelnen wurden Kalibrierarbeiten durchgeführt für:

- Steuerwinkel
- Steuerkräfte
- Lasten am Heckausleger

Ein erneutes Kalibrieren der Temperatursensoren am Heckausleger sowie des Rotorazimutwinkelgebers ist durch den Tausch der Messanlagen nicht notwendig. Die Drucksonden sowie der Außentemperatursensor wurden nicht erneut kalibriert bzw. sind nicht angeschlossen, da diese Signale vom Nasenmast geliefert werden, welcher im Projekt MIND am CoAX montiert wurde.



Abbildung 1 COAX 2D des DLR (im Vordergrund)



# 2. Messanlagen und Datenaufzeichnung

In [1] ist die Basismessanlage beschrieben, welche aus einer Messbox auf dem Ko-Pilotensitz zur Messung der Signale des nicht-drehenden Systems sowie jeweils einer Messplatine pro Rotorebene zur Erfassung der drehenden Sensorsignale besteht. Wie oben erwähnt, wurde die Messbox durch einen Rekorder vom Typ MDR ersetzt (siehe Abbildung 2 Datenrekorder MDR auf dem Ko-Pilotensitz).



Abbildung 2 Datenrekorder MDR auf dem Ko-Pilotensitz

Zum Starten einer Messung wird zunächst die Batterie an den MDR angeschlossen. Danach wird mithilfe der Software D4Recorder eine Verbindung zum Rekorder aufgebaut, um die Messung zu starten bzw. zu stoppen. Dabei wird auf dem internen Speicher eine neue Messdatei im Binärformat ch10 angelegt, welches in Kapitel 10 des Telemetriestandards IRIG 106 definiert ist.

Um die Daten auswerten zu können, werden die Daten mithilfe einer im Projekt entstandenen Software am PC zunächst in das Format csv (comma-separated values) konvertiert. Die Auswertung der jeweiligen Messdaten erfolgte mittels Excel.



# 3. Definitionen und Koordinatensysteme

Der Ursprung des Koordinatensystems ist der Getriebemittelpunkt. Dies erleichtert erheblich eventuelle CAD Vermessungen durch edm. Alle Baugruppen des CoAX 2D haben als Referenz-Nullpunkt den Getriebemittelpunkt. Die x-Achse zeigt positiv nach vorn, die y-Achse zeigt positiv zur rechten Seite, wie in den Abbildung 3 - 5 zu sehen. Die z-Achse zeigt positiv nach unten, also entgegengesetzt zum Rotorschub. Alle Momente sind positiv nach der rechten Hand-Regel definiert.

x<sup>+</sup> Gieren nach rechts ist positiv Gieren nach links ist negativ

Die Definition der Steuer- und Pedalhebelrichtungen zeigen Abbildung 6 und Abbildung 7.

Abbildung 3 Koordinatensysteme Draufsicht



Abbildung 4 Koordinatensysteme Seitenansicht





Abbildung 5 Koordinatensysteme Frontansicht



Abbildung 6 Definition der Steuer- und Pedalhebelrichtungen ST\_AX, ST\_AZ, COLL\_A



Abbildung 7 Definition der Steuerhebelrichtung ST\_AY



# 4. Kalibrierungen

### 4.1. Winkel Kollektivhebel (COLL\_A)

Der Winkel des Kollektivhebels  $COLL_A$  wird in % gemessen. Die positive Richtung ist als Auslenkung nach oben definiert. Der Nullpunkt 0 % ist der untere Anschlag, 100 % entsprechen dem oberen Anschlag.

Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe des WYLER-Inklinometers, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Das verwendete Inklinometer verfügt über keine Schnittstelle zum Datenrekorder, daher wurden die am Inklinometer angezeigten Winkel von Hand in eine Exceltabelle eingetragen. Die korrespondierenden Spannungen wurden ebenfalls von Hand in dieselbe Tabelle eingetragen. Um diese ablesen zu können, wurde der Rekorder mit der Konfigurationssoftware eZViewer verbunden. Die Absolutwinkel des Kollektivhebels variierten gegenüber der Horizontalen zwischen 1,9° bei 0 % und 18,3° bei 100 %, was einen möglichen Verstellwinkelbereich von insgesamt 16,4° bedeutet. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse sind im Protokoll in Anhang 7.1 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor $\left[\frac{\%}{V}\right]$	Offset [%]	Kalibrierbereich [%]	Linearitätsab- weichung [%]
<b>COLL_A</b> 3,838E+02		5,783E+01	0 100 (1,9° 18,3°)	0,3

Tabelle 1 Ergebnisse der Kalibrierung des Kollektivhebelwinkels



Abbildung 8 Kalibrieraufbau zur Messung von COLL\_A



#### 4.2. Winkel Steuerhebel (ST\_AX, ST\_AY)

Die Winkel des Steuerhebels  $ST_{AX}$  und  $ST_{AY}$  werden jeweils in % gemessen. Die positive Richtung von  $ST_{AX}$  ist als Auslenkung nach hinten definiert. Der Nullpunkt 0 % ist der vordere Anschlag, 100 % entsprechen dem hinteren Anschlag. Die positive Richtung von  $ST_{AY}$  ist als Auslenkung nach rechts definiert. Der Nullpunkt 0 % ist der linke Anschlag, 100 % entsprechen dem rechten Anschlag.

Die Kalibrierung erfolgte analog zur Kalibrierung des Kollektivhebels (Kap. 4.1) mit Hilfe des WYLER-Inklinometers, dargestellt in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Absolutwinkel des Steuerhebels in Längsrichtung  $ST_{AX}$  variierten gegenüber der Vertikalen zwischen 16,8° bei 0 % und -23,7° bei 100 %, was einen möglichen Verstellwinkelbereich von insgesamt 40,5° bedeutet. Die Absolutwinkel des Steuerhebels in Querrichtung  $ST_{AY}$  variierten gegenüber der Vertikalen zwischen der Vertikalen zwischen -18,3° bei 0 % und 15,9° bei 100 %, was einen möglichen Verstellwinkelbereich von insgesamt 34,2° bedeutet. Die Maximalwinkel sind allerdings nur dann erreichbar, wenn sich die 90° Richtung in Mittelstellung befindet, so dass sich insgesamt eine etwa kreisförmige Begrenzung ergibt.

In Tabelle 2 finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse sind im Protokoll in Anhang 7.2 und 7.3 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor $\left[\frac{\%}{V}\right]$	Offset [%]	Kalibrierbereich [%]	Linearitätsab- weichung [%]
ST_AX	-9,588E+01	8,528E+01	0 100 (16,8°23,7°)	0,9
ST_AY	-1,679E+02	9,497E+01	0 100 (-18,3° 15,9°)	0,9

Tabelle 2 Ergebnisse der Kalibrierung der Steuerhebelwinkel





Abbildung 9 Kalibrieraufbau zur Messung von ST\_AX (links), ST\_AY (rechts)

### 4.3. Winkel Pedale (ST\_AZ)

Die Winkel der Pedale  $ST_{AZ}$  wird in % gemessen. Die positive Richtung ist als Auslenkung des rechten Pedals nach vorn (Drücken) definiert. Der Nullpunkt 0 % ist das voll gedrückte linke Pedal, 100 % entsprechen dem voll gedrückten rechten Pedal.

Anders als bei der Kalibrierung von Kollektivhebel und Steuerknüppel, war aus Platzgründen die Verwendung des WYLER-Inklinometers bei den Pedalen nicht möglich. Stattdessen wurde zunächst das linke Pedal auf den vorderen Anschlag verfahren und anschließend das rechte Pedal auf den vorderen Anschlag verfahren, was jeweils 0 % bzw. 100 % Ausschlag entspricht. Die korrespondierenden Spannungen wurden in die Excel-Tabelle eingetragen.

In Tabelle 3 finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse der Kalibrierung sind im Protokoll in Anhang 7.4 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor	Offset	Kalibrierbereich	Linearitätsab-
	[ <u>%</u> ]	[%]	[%]	weichung
				[%]
ST_AZ	1,041E+02	3,959E+01	0 100	1,1

Tabelle 3 Ergebnisse der Kalibrierung des Pedalwinkels



#### 4.4. Kraft Kollektivhebel (COLL\_FZ)

Die Kraft des Kollektivhebels  $COLL_{FZ}$  wird in N gemessen. Die positive Richtung ist als Zug nach oben definiert. Da der Kollektivhebel eine Vorrichtung zur Wegbegrenzung und Dämpfung aufweist, welche bei der Kalibrierung die Messergebnisse verfälschen würde, wurde zunächst die Taumelscheibe des unteren Rotors fixiert. Dazu wurde eine geeignete Klemme zwischen Taumelscheibe und Struktur montiert. In der arretierten Position wurde die Wegbegrenzungsvorrichtung entkoppelt und Zugkräfte aufgebracht.

Die Lastaufbringung erfolgte mittels eines Kraftaufnehmers (HBM U3), welcher über einen Messverstärker (HBM ClipX) direkt mit dem Datenrekorder verbunden war. Die jeweilige Kraft wurde am Rohrende senkrecht zum Hebel bis ca. -170 N von Hand eingeleitet. Der Hebelarm vom Rohrende bis zur DMS-Position beträgt 532 mm. Für eine Umrechnung der Hebelkraft auf andere Positionen müssen die gegebenen Hebelverhältnisse beachtet werden. **Die angegebene Kalibriergleichung gilt nur für den gemessenen Hebelarm am Rohrende.** 

In Tabelle 4 finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse der Kalibrierung sind im Protokoll in Anhang 7.5 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor [ <u>N</u> ]	Offset [ <i>N</i> ]	Kalibrierbereich [ <i>N</i> ]	Linearitätsab- weichung	
				[%]	
COLL_FZ*	1,362E+04	-5,457E-01	-170 0	4,5 (8 N)	

Tabelle 4 Ergebnisse der Kalibrierung der Kollektivhebelkraft (\*nur gültig für Position Rohrende)

### 4.5. Kraft Steuerhebel (ST\_FX, ST\_FY)

Die Kräfte des Steuerhebels  $ST_{FX}$  und  $ST_{FY}$  werden in N gemessen. Die positive Richtung von  $ST_{FX}$  ist als Kraft nach hinten definiert. Die positive Richtung von  $ST_{FY}$  ist nach rechts definiert.

Die Lastaufbringung erfolgte analog zur Kalibrierung der Kraft am Kollektivhebel (Kap. 4.4) mittels eines Kraftaufnehmers (HBM U3), welcher über einen Messverstärker (HBM ClipX) direkt mit dem Datenrekorder verbunden war. Die jeweilige Kraft wurde am Hebel direkt unterhalb des Griffstücks senkrecht zum Hebel bis ca. 200 *N* von Hand jeweils als Zugkraft eingeleitet, wie in Abbildung 10 zu sehen. Der Hebelarm zwischen Unterkante Griff zum DMS ist 222 *mm*. Das verwendete Seil hatte einen Radius von 2mm. Somit beträgt der Hebelarm vom Seilangriffspunkt bis zur DMS-Position 220 *mm*. Für eine Umrechnung der Hebelkraft auf andere Positionen müssen die gegebenen Hebelverhältnisse beachtet werden. **Die angegebenen Kalibriergleichung gelten nur für den gemessenen Hebelarm zum Seilangriffspunkt.** 



In Tabelle 5 finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse der Kalibrierung sind im Protokoll in Anhang 7.6 und 7.7 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor $\left[\frac{N}{V}\right]$	Offset [ <i>N</i> ]	Kalibrierbereich [ <i>N</i> ]	Linearitätsab- weichung [%]
ST_FX	2,022E+04	3,071E-01	0 200	4,8 (10 N)
ST_FY	-1,9541E+04	7,3364E-01	0 200	4,5 (9 N)

Tabelle 5 Ergebnisse der Kal	librierung der Steuerhebelkraft
------------------------------	---------------------------------



Abbildung 10 Kalibrieraufbau zur Messung von ST\_FX (links), ST\_FY (rechts)

### 4.6. Kraft Pedale (PD\_L\_FX, PD\_R\_FX)

Die Kräfte der Pedale  $PD_{L_{FX}}$  und  $PD_{L_{FY}}$  werden in N gemessen. Die positive Richtung ist, wie beim Pedalwinkel, als Druckkraft am rechten Pedal definiert also dementsprechend Zugkraft am linken Pedal.

Die Lastaufbringung erfolgte auch hier analog zur Kalibrierung der Kraft am Kollektivhebel (Kap. 4.4) mittels eines Kraftaufnehmers (HBM U3), welcher über einen Messverstärker (HBM ClipX) di-



rekt mit dem Datenrekorder verbunden war. Die jeweilige Lasteinleitung von Hand erfolgte senkrecht sowie mittig der Pedale als Druckkraft mit einem Betrag von bis zu ca. 160 *N*, dargestellt in Abbildung 11. Der Hebelarm von der Pedalmitte bis zum Drehpunkt beträgt 150 *mm*. Für eine Umrechnung der Pedalkraft auf andere Positionen müssen die gegebenen Hebelverhältnisse beachtet werden. Die angegebenen Kalibriergleichung gelten nur für den gemessenen Hebelarm an der Pedalmitte.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse der Kalibrierung sind im Protokoll in Anhang 7.8 und 7.9 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor $\left[\frac{N}{V}\right]$	Offset [ <i>N</i> ]	Kalibrierbereich [ <i>N</i> ]	Linearitätsab- weichung [%]
PD_L_FX	-9,076E+04	-5,937E-01	-154 0	5,4d (8 N)
PD_R_FX	8,276E+04	5,331E-01	0 160	6,9 (11 N)

Tabelle 6 Ergebnisse der Kalibrierung der Pedalkräfte



Abbildung 11: Kalibrieraufbau zur Messung von PD\_L\_FX



#### 4.7. Lasten am Heckausleger (TAIL\_MX, TAIL\_MY, TAIL\_MZ)

Es werden drei verschiedene Heckauslegerlasten gemessen, das Torsionsmoment  $TAIL_{MX}$  (Rollmoment), das vertikale Biegemoment  $TAIL_{MY}$  (Nickmoment) und das horizontale Biegemoment  $TAIL_{MZ}$  (Giermoment). Alle Momente werden in Nm gemessen. Die Vorzeichendefinition entspricht der des hubschrauberfesten Koordinatensystems, wie in Kapitel 3 beschrieben.

Zur Einleitung eines rein negativen Torsionsmomentes  $-TAIL_{MX}$  wurde der Aufbau wie in Abbildung 12 zu sehen verwendet. Ein mittig aufgehängter Querbalken war auf der rechten Seite mittels eines Seils mit dem Ende des Höhenleitwerks verbunden, um Zugkräfte nach oben einzuleiten. Auf der linken Seite wurde das Seil über eine am Boden befindliche Umlenkrolle zum linken Ende des Höhenleitwerks geführt. Dadurch können dort Zugkräfte nach unten eingeleitet werden. Die Aufhängung des Querbalkens wurde mit Hilfe eines Flaschenzuges realisiert, in dessen Lastpfad außerdem ein Kraftsensor (HBM U3) integriert war, welcher über einen Messverstärker (HBM ClipX) direkt mit der Messbox verbunden war. Der Hebelarm zum jeweiligen Ende des Höhenleitwerks betrug 629 mm. Über den Flaschenzug wurden zur Kalibrierung Zugkräfte bis zu einem maximalen Torsionsmoment bis zu einem Betrag von etwa 120 Nm aufgebracht.

Für die Messung eines positiven Nickmoments  $TAIL_{MY}$  wurde über eine Hand-Zugstange eine Kraft vertikal nach unten aufgebracht, welche über ein Seil auf den Heckausleger übertragen wurde. Analog zum Torsionsmoment war im Lastpfad ein Kraftsensor (HBM U3) integriert. Die Lasteinleitung erfolgte nahe der Vorderkante des Höhenleitwerks bei 1670 mm Abstand zur DMS Position. Für ein negatives Nickmoment erfolgte die Krafteinleitung anschließend von oben (Abbildung 13 links). Die aufgebrachten Maximalkräfte lagen betragsmäßig bei etwa 450 Nm.

Analog zum Nickmoment wurde auch die Kalibrierung des Giermoments durchgeführt (siehe Abbildung 13 rechts). Über die Hand-Zugstange wurden beidseitig Kräfte horizontal aufgebracht und parallel mit dem Kraftsensor mitgemessen. Die Lasteinleitung erfolgte auch hier nahe der Vorderkante des Höhenleitwerks bei 1670 mm Abstand zur DMS Position, so dass Maximalmomente von betragsmäßig etwa 445 Nm erzeugt wurden.

In Tabelle 7 finden sich die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung. Die detaillierten Ergebnisse der Kalibrierung sind im Protokoll in Anhang 7.10 bis 7.12 zusammengefasst.

Sensor	Kalibrierfaktor [ <u>Nm</u> ]	Offset [ <i>Nm</i> ]	Kalibrierbereich [ <i>Nm</i> ]	Linearitätsab- weichung
				[%]
TAIL_MX	6,191E+04	2,583E+00	-120 0	3,0 (3,5 Nm)
TAIL_MY	1,493E+05	-6,111E+00	-445 +445	4,0 (35 Nm)
TAIL_MZ	-2,469E+05	-4,550E+00	-445 +290	2,8 (20 Nm)

Tabelle 7 Ergebnisse der Kalibrierung der Lasten am Heckausleger





Abbildung 12 Kalibrieraufbau zur Messung von TAIL\_MX



Abbildung 13 Kalibrieraufbau zur Messung von TAIL\_MY (links), TAIL\_MZ (rechts)



# 5. Zusammenfassung

Im September 2022 wurden die durch den Tausch der Messanlagen im Projekt MIND notwendigen Kalibrierungen an den Analogsensoren der Basismessanlage des DLR-COAX 2D am DLR in Braunschweig durchgeführt.

In Anhang 7.13 sind alle messbaren Größen der Basismessanlage, welche im Projekt MIND verwendet werden, mit Richtungsangaben zusammengefasst, die ermittelten Kalibrierfaktoren in Anhang 7.14.



# 6. Literaturverzeichnis

- [1] O. Schneider, *DLR COAX 2D, Einbau- und Kalibrierbericht der DMS-Instrumentierung*, DLR-IB-FT-BS-2021-73, 2021
- [2] O. Schneider, DLR CoAX 2D, Kalibrierbericht 2, DLR-IB-FT-BS-2022-2-S4
- [3] B. Grebing, 2016\_08\_10\_CoAX 2D\_CURoT\_Calibration.docm, Projektbericht
- [4] Dr. Matthias Cremer, *Einbaubericht*, Dok.-Nr. mW-edm-2016-0, messWERK GmbH, 29.07.2016



# 7. Anhang



# 7.1. Kalibrierprotokoll COLL\_A

Abbildung 14: Kalibrierkurve und Residuen Kollektivhebelwinkel COLL\_A



### 7.2. Kalibrierprotokoll ST\_AX

Abbildung 15: Kalibrierkurve und Residuen Längssteuerwinkel ST\_AX



#### 7.3. Kalibrierprotokoll ST\_AY



Abbildung 16: Kalibrierkurve und Residuen Quersteuerwinkel ST\_AY



#### 7.4. Kalibrierprotokoll ST\_AZ

Abbildung 17: Kalibrierkurve und Residuen Pedalsteuerwinkel ST\_AZ





### 7.5. Kalibrierprotokoll COLL\_FZ

Abbildung 18: Kalibrierkurve Kollektivhebelkraft COLL\_FZ



Abbildung 19: Residuen Kollektivhebelkraft COLL\_FZ





### 7.6. Kalibrierprotokoll ST\_FX

Abbildung 20: Kalibrierkurve Längssteuerkraft ST\_FX



#### Abbildung 21: Residuen Längssteuerkraft ST\_FX



# 7.7. Kalibrierprotokoll ST\_FY



Abbildung 22: Kalibrierkurve Quersteuerkraft ST\_FY



Abbildung 23: Residuen Quersteuerkraft ST\_FY





#### 7.8. Kalibrierprotokoll PD\_L\_FX

Abbildung 24: Kalibrierkurve Steuerkraft linkes Pedal PD\_L\_FX



Abbildung 25: Residuen Steuerkraft linkes Pedal PD\_L\_FX





#### 7.9. Kalibrierprotokoll PD\_R\_FX

Abbildung 26: Kalibrierkurve Steuerkraft rechtes Pedal PD\_R\_FX



#### Abbildung 27: Residuen Steuerkraft rechtes Pedal PD\_R\_FX



#### MIND - TAIL\_MX 20 0 -20 Moment [Nm] -40 -60 -80 -100 Moment -120 Linear (Moment) y = 6,191E+04x + 2,583E+00 -140 -0,002 -0,002 -0,001 -0,001 0,000 0,001 Spannung [V]

#### 7.10. Kalibrierprotokoll TAIL\_MX

Abbildung 28: Kalibrierkurve Heckausleger-Torsionsmoment TAIL\_MX



Abbildung 29: Residuen Heckausleger-Torsionsmoment TAIL\_MX





#### 7.11. Kalibrierprotokoll TAIL\_MY

Abbildung 30: Kalibrierkurve Heckausleger-Schlagbiegemoment TAIL\_MY



Abbildung 31: Residuen Heckausleger-Schlagbiegemoment TAIL\_MY



#### MIND - TAIL\_MZ 400 300 200 100 **W** -100 -200 -300 Moment -400 Linear (Moment) y = -2,469E+05x - 4,550E+00 -500 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 0,0010 0,0015 0,0020 Spannung [V]

#### 7.12. Kalibrierprotokoll TAIL\_MZ

Abbildung 32: Kalibrierkurve Heckausleger-Schwenkbiegemoment TAIL\_MZ



Abbildung 33: Residuen Heckausleger-Schwenkbiegemoment TAIL\_MZ

	Nr.	Blatt	Akronym	Einheit	Beschreibung	Messkanal	Definition (positive Richtung)
	2.1		RM_PSI		Rotormast Azimut-Winkel	MDR	0° bei Blatt U1 (SW) hinten
	2.2		COLL_A	%	Steuerwinkel Kollektiv	MDR	hoch ziehen
	2.3		ST_AY	%	Steuerwinkel Rollachse	MDR	Knüppel nach rechts
	2.4		ST_AX	%	Steuerwinkel Nickachse	MDR	Knüppel nach hinten
	2.5		ST_AZ	%	Steuerwinkel Gierachse +	MDR	rechtes Pedal drücken
	2.7		COLL_FZ	Ν	Steuerkraft Kollektivhebel	MDR	hoch ziehen
	2.8		ST_FX	N	Steuerkraft Nicken	MDR	Knüppel nach rechts
_	2.29		ST_FY	N	Steuerkraft Rollen	MDR	Knüppel nach hinten
tem	2.9		PD_L_FX	N	Steuerkraft linkes Pedal	MDR	Pedal ziehen
yst	2.10		PD_R_FX	N	Steuerkraft rechtes Pedal	MDR	Pedal drücken
S S	2.11		TAIL_MX	Nm	Heck Torsionsmoment Mx	MDR	HLW rechts runter links hoch
pde	2.12		TAIL_MY	Nm	Heck Schlagbiegemoment My	MDR	Heck runter
ehe	2.13		TAIL_MZ	Nm	Heck Schwenkbiegemoment Mz	MDR	Heck nach links
dr	2.14		TMP_MX1	Ohm	Heck DMS Temperatur Mx links	MDR	
, t	2.15		TMP_MX2	Ohm	Heck DMS Temperatur Mx rechts	MDR	
Nic	2.16		TMP_MY1	Ohm	Heck DMS Temperatur My oben	MDR	
	2.17		TMP_MY2	Ohm	Heck DMS Temperatur My unten	MDR	
	2.18		TMP_MZ1	Ohm	Heck DMS Temperatur Mz links	MDR	
	2.19		TMP_MZ2	Ohm	Heck DMS Temperatur Mz rechts	MDR	
	2.20		Pstau	hPa	Staudruck	MDR	
	2.21		Pstat	hPa	Statischer Druck	MDR	
	2.22		Ttotal_r	Ohm	OAT (Outside Air Temperature)	MDR	Nicht am Rekorder angeschlossen
	2.23		iNAT_RS422		iMAR iNAT-M200	MDR	
	2.25		Event_P		Event-Button	MDR	Eventbutton Stick

#### 7.13. Finale Liste der verwendeten Basissensorik

Tabelle 8: Basissensorik im stehenden System

# 7.14. Zusammenfassung der Kalibrierergebnisse

Sensor	p4	р3	p2	p1	р0
ST_AX	0,0	0,0	0,0	-9,588E+01	8,528E+01
ST_AY	0,0	0,0	0,0	-1,679E+02	9,497E+01
ST_AZ	0,0	0,0	0,0	1,041E+02	3,959E+01
COLL_A	0,0	0,0	0,0	3,838E+02	5,783E+01
ST_FX	0,0	0,0	0,0	2,022E+04	3,071E-01
ST_FY	0,0	0,0	0,0	-1,954E+04	7,336E-01
PD_L_FX	0,0	0,0	0,0	-9,076E+04	-5,937E-01
PD_R_FX	0,0	0,0	0,0	-8,276E+04	5,331E-01
COLL_FZ	0,0	0,0	0,0	1,362E+04	-5,457E-01
TAIL_MX	0,0	0,0	0,0	6,191E+04	2,583E+00
TAIL_MZ	0,0	0,0	0,0	1,493E+05	-6,111E+00
TAIL_MY	0,0	0,0	0,0	-2,469E+05	-4,550E+00

Tabelle 9: Kalibrierpolynome