
Schlussbericht

DIGfly

Entwicklung physikalisch umfassender digitaler Modellierungen und Simulationsmethoden für den Entwurf senkrecht-startender und -landender Fluggeräte

Förderkennzeichen: 20X1909D

AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der Inhalt dieser Unterlage ist geistiges Eigentum von AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Außerhalb der Regelung des Zuwendungsbescheides ist eine Weitergabe an Dritte, sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung des Inhaltes an Dritte nicht gestattet, soweit nicht vorher schriftlich von AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustereintragung vorbehalten.

The content of this document is the intellectual property of AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH. The responsibility for the content of this publication rests with the author.

The project which forms the basis for this report is endorsed and funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Apart from the user rights contained in the notification concerning the allocation of funds, copying of this document to third parties and the use of the contents thereof, are forbidden without prior written consent by AIRBUS HELICOPTERS DEUTSCHLAND GmbH. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.

- Leere Seite-

Inhalt

A Zusammenfassung	4
A.1 Aufgabenstellung	4
A.2 Voraussetzungen des Vorhabens und vorangegangene Forschungsprojekte	5
A.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
Technologische Zielsetzung	7
HAP1 Fortschrittliche CFD Module	7
HAP3 Prozessautomatisierung	7
HAP4 Demonstration an Use Cases	8
A.4 Wissenschaftlich/technischer Stand	9
A.5 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse	10
A.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
B. Ergebnisse des Forschungsvorhabens	12
HAP1 Fortschrittliche CFD Module	12
AP 1.3 Flexibilisierung Netzstrategien	12
HAP3 Prozessautomatisierung	14
AP 3.2 FlowSimulator-Einbindung & Schnittstellen	14
HAP4 Demonstration an Use Cases	16
AP 4.1 Use Case Definition	16
AP 4.2 Simulationen	19
AP 4.3 Evaluierung & Best Practice	21
AP 4.4 Einbindung in industrielle Prozesse	23
Annex 1	25
Abkürzungsverzeichnis / Glossar	25

A Zusammenfassung

A.1 Aufgabenstellung

Die aerodynamische und flugmechanische Auslegung konventioneller sowie fortschrittlicher VTOL-Luftfahrzeuge (Vertical Takeoff and Landing) erfordert die vollständige Charakterisierung des Flugverhaltens bis an die Eckpunkte der Flugvelope. Trotz Fortschritten in Computerrechenleistung und numerischen Methoden führen die Vielzahl zu betrachtender Punkte und die Notwendigkeit instationärer Simulationen zu einem Zeitaufwand in der Größenordnung von Monaten für die Untersuchung einer einzelnen Variante.

Ziel von Airbus Helicopters im Vorhaben DIGIfly war daher, die heutigen Prozesse unter spezieller Berücksichtigung der Anforderungen der Drehflüglerentwicklung durch neue Verfahren zu optimieren sowie zu automatisieren, in der gesamten Kette der Simulation und Datenaufbereitung:

- Automatisierung und Flexibilisierung von Vernetzungsmethoden auch für komplexe, unkonventionelle Geometrien
- Effiziente CFD-Simulation, computerunterstützte Analyse von Konvergenzverhalten und Rechengenauigkeit / Unsicherheiten
- Kombination experimenteller sowie numerischer Ergebnisse unterschiedlicher Modellierungstiefe zur automatischen Erzeugung vollständiger aerodynamischer Datensätze
- Experimentelle Anwendung und industrielle Validierung der Prozesskette

A.2 Voraussetzungen des Vorhabens und vorangegangene Forschungsprojekte

Die Airbus Helicopters Deutschland GmbH (AHD) entwickelt und nutzt seit langem numerische Simulationen zur Vorhersage der aeromechanischen Phänomene am Hubschrauber. So wurde beispielsweise im Rahmen der Projekte Cleansky und Bluecopter gezeigt, dass sowohl Rotorentwicklung als auch Widerstandsoptimierung der Zelle mit Hilfe numerischer Verfahren in sehr guter Übereinstimmung mit Flugversuchsergebnissen liegt und industriell einsatzreif ist. Der "numerische Windkanal" ist damit in der Hubschrauberentwicklung bereits weitestgehend Realität und komplementiert experimentelle Methoden. Gleichzeitig ist die intelligente Verknüpfung experimenteller Mess- und Flugversuchsdaten mit numerischen Untersuchungen speziell für Weiterentwicklungen und kleine Designänderungen von sehr hohem industriellen Interesse. Im LuFo Projekt CHARME lieferte die Anwendung und Weiterentwicklung numerischer Verfahren zur Absicherung des aeromechanischen Entwurfs entscheidende Fortschritte für die Minimierung des Entwicklungsrisikos. Aufgrund dieser Fähigkeiten ist die numerische Simulation inzwischen zu einem Standardwerkzeug in Produktbewertung und Entwicklung neuer Hubschrauberkonfigurationen bei Airbus Helicopters geworden.

Das Vorhaben DIGIfly baut auf einer Reihe von Forschungsaktivitäten auf, die die Partner von DIGIfly in den vergangenen Jahren durchgeführt haben, und ist fester Bestandteil der Airbusstrategie. Hier sind aus Airbus Helicopters Sicht insbesondere die Vorhaben TOSCANA und CHARME zu erwähnen. Die gute Zusammenarbeit mit dem DLR, aber auch mit den anderen Verbundpartnern speziell innerhalb der Airbus Gruppe sollte weiter intensiviert werden. Dabei sollten Synergien hinsichtlich der numerischen Behandlung von Dreh- und Starrflüglern identifiziert und konsequent genutzt werden. Darüber hinausgehende, sehr hubschrauberspezifische Herausforderungen wie die fortschrittliche aeromechanische Kopplung wurden weitgehend parallel dazu im LuFo VI Verbundvorhaben eVolve adressiert.

Das Verbundvorhaben DIGIFly hat in großem Maße die Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner gefördert. Die gemeinsame Zielsetzung bedingte eine starke Netzwerkbildung sowohl zwischen den Industrievertretern als auch zu den Forschungseinrichtungen.

A.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Airbus Helicopters Deutschland (AHD) war im Rahmen des Eigenantrags in ausgewählten Hauptarbeitspaketen des Verbundvorhabens DIGifly aktiv. Die Beteiligung seitens AHD ist in der Gliederung der Arbeitspakete in Abbildung 1 farblich hervorgehoben und bezieht sich auf folgende technische Inhalte:

- HAP1 Fortschrittliche CFD-Module
- HAP3 Prozess-Automatisierung
- HAP4 Demonstration an Use Cases

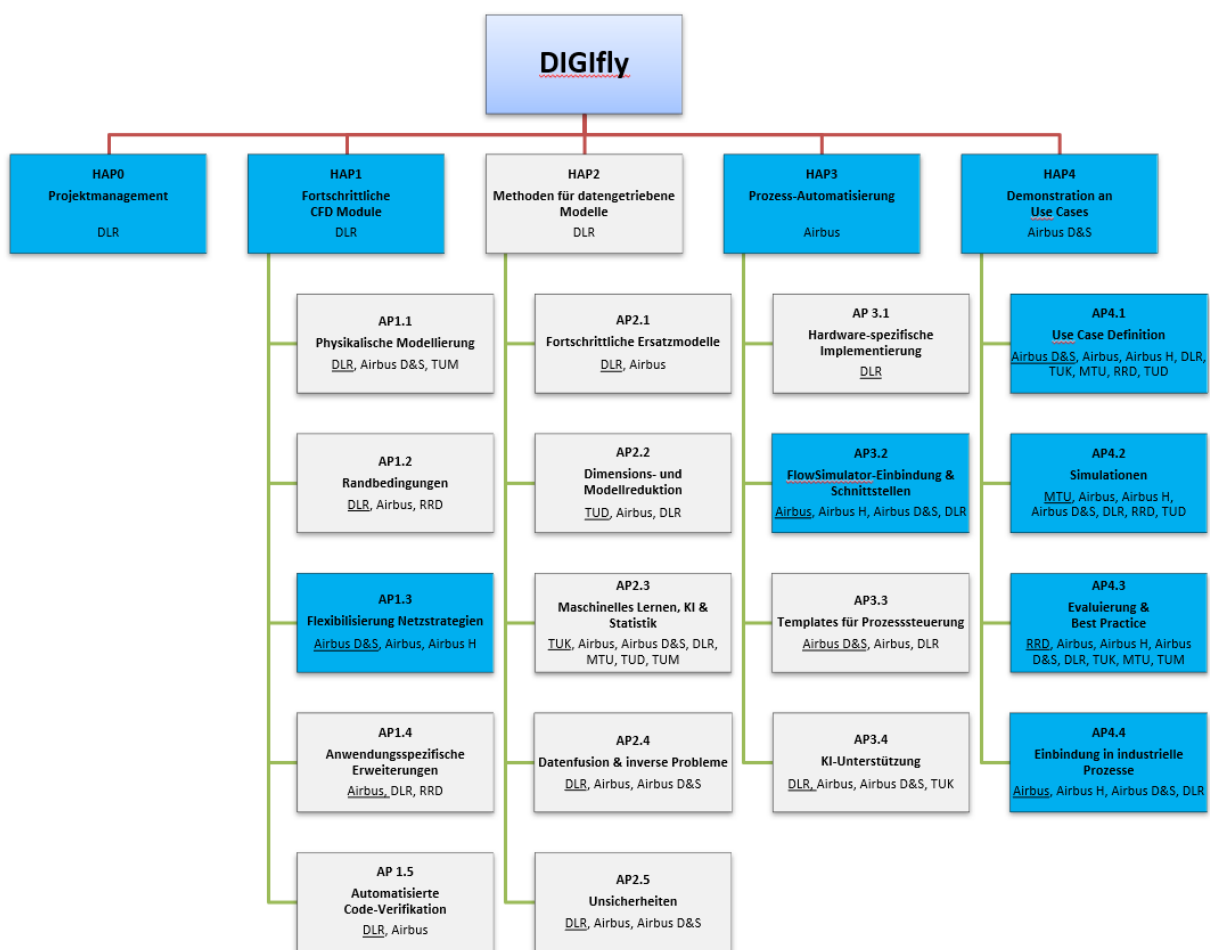


Abbildung 1: Projektstrukturplan des Verbundvorhabens DIGifly, AHD Beteiligung in blau

Technologische Zielsetzung

- Beschleunigung der Netzgenerierung
 - Automatisierung und Flexibilisierung von Vernetzungsmethoden auch für komplexe, unkonventionelle Geometrien
- CODA / FlowSimulator relevant für Hubschrauberentwicklung
 - Sicherstellung der Anwendbarkeit der CODA/FlowSimulator-Umgebung und neu entwickelter Prozesse für hubschrauberspezifische Anwendungen
- Anwendung und Bewertung der neuen Verfahren
 - Definition industrieller Testfälle für Zielanwendungen am Hubschrauber
 - Anwendung der entwickelten Prozesse und Verfahren
 - Bewertung und Validierung der Verfahren
 - Vorbereitung der Einbettung in industrielle Prozesse zur Sicherstellung der nachhaltigen Verwertung

HAP1 Fortschrittliche CFD Module

Ziele des Arbeitspakets

- Automatisierung und Flexibilisierung von Vernetzungsmethoden auch für komplexe, unkonventionelle Geometrien

Ablauf:

Auf Seiten der Geometrievernetzung wurden unterschiedliche neue Softwarelösungen getestet mit dem Ziel, gegenüber heutigen Prozessen eine höhere Effizienz, Robustheit und einen hohen Automatisierungsgrad zu realisieren. Die Evaluierung erfolgte anhand von Geometrien unterschiedlicher Komplexität.

HAP3 Prozessautomatisierung

Ziele des Arbeitspakets

- Sicherstellung der Anwendbarkeit der CODA/FlowSimulator-Umgebung und neu entwickelter Prozesse für hubschrauberspezifische Anwendungen

Ablauf:

Bei der Integration der entwickelten Verfahren in den FlowSimulator wurde der Fokus auf die Anwendbarkeit für Airbus Helicopters gelegt. Zu diesem Zweck wurden erforderliche Schnittstellen definiert und ggf. identifizierte Spezifika bei der Implementierung gemeinsam mit den Partnern umgesetzt. Oberste Priorität hatten dabei die in HAP4 definierten Use Cases im Rahmen einer weitestgehend automatisierten Polarengenerierung unter Nutzung bestehender und neu zu entwickelnder Skripte und Module. Die Arbeiten basierten auf dem im Rahmen des

LuFo-Projekts TOSCANA begonnenen Umstieg von AHD auf die neue CFD-/FlowSimulator-Umgebung

HAP4 Demonstration an Use Cases

Ziele des Arbeitspakets

- Definition der industriellen Ziellanwendung
- Experimentelle Anwendung der entwickelten Prozesse und Verfahren
- Bewertung und Validierung des Verfahrens
- Vorbereitung der Einbettung in industrielle Prozesse zur Sicherstellung der nachhaltigen Verwertung

Ablauf:

Um die Ziellanwendung und damit die Anforderungen an die Simulationsumgebung zu definieren, wurden hubschrauberspezifische Testfälle unterschiedlicher Komplexität und mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten definiert. Angefangen von der Polarenrechnung einfacher geometrischer Körper oder einer isolierten Hubschraubierzelle über die Berücksichtigung des geometrisch anspruchsvollen Rotorkopfs bis hin zur Modellierung des Rotoreffekts durch eine Wirkscheibe sollte das relevante Aufgabenspektrum unstrukturierter CFD-Löser bei Airbus Helicopters betrachtet werden. Auch inkompressible CFD-Verfahren zur Beschleunigung der Simulationen sollten dabei Anwendung finden.

Seitens Airbus Helicopters bedurfte es zunächst einer klaren Definition des aktuellen und angestrebten Polarengenerierungsprozesses und der Erwartungen auf Seiten von Airbus Helicopters bezüglich Datenfusionsmethoden.

Die neu implementierten Verfahren zur Vernetzung und Polarengenerierung wurden zunächst anhand der definierten Anwendungsfälle getestet. Dabei umfassten die Arbeiten den vollständigen Prozess einschließlich der Gittererstellung, der CFD-Rechnung und der Auswertung und Aufbereitung der gewonnenen Daten, etwa in Form aerodynamischer Polaren.

Die so erprobten Anwendungsfälle wurden nachfolgend bewertet und dokumentiert. Kriterien für die Evaluierung waren unter anderem die Effizienz und Robustheit der Simulationen und des Gesamtprozesses sowie der erzielte Automatisierungsgrad. Als Referenz für die Beurteilung diente dabei der Status Quo zu Projektbeginn mit weitestgehend manuellen Verfahren. Die Dokumentation umfasste neben der Beschreibung des technischen Vorgehens und der Funktionalitäten der Toolkette auch Handlungsempfehlungen basierend auf den Erfahrungen bei den durchgeführten Testfällen.

Die als ausreichend reif und effizienzsteigernd beurteilten Anwendungsfälle sollten für die Überführung in eine industrielle Nutzung vorbereitet, dazu notwendige Änderungen in existierenden Skripten und Prozessen umgesetzt werden. Um das Anwendungsspektrum zu erweitern und eine Flexibilität für noch nicht betrachtete Use Cases zu erhalten, wurden vor allem auch einzelne Elemente der neu entwickelten Funktionalitäten den Anwendern zur Verfügung gestellt.

A.4 Wissenschaftlich/technischer Stand

Innerhalb der Airbus Gruppe und Airbus Helicopters sind heute mehrere verschiedene CFD-Rechenverfahren, Vernetzungsanwendungen und Datenanalyse-Verfahren im Einsatz, woraus sich ein hoher Validierungs-, Wartungs- und Einarbeitungsaufwand ergibt. Die Automatisierung von Arbeitsschritten beschränkt sich meist auf wenige aufeinanderfolgende Schritte.

Durch die Automatisierung zeitintensiver Arbeitsschritte in der Vor- und Nachbearbeitung der numerischen Simulationen, wie beispielweise der Vernetzung und dem Auswerten von Ergebnissen, sowie der Nutzung moderner und effizienter CFD-Rechenverfahren, wird die Entwicklungszeit verkürzt bzw. die Anzahl möglicher Untersuchungen bei gegebener zeitlicher Randbedingung erhöht. Risiken in der aerodynamischen und flugmechanischen Auslegung des Hubschraubers können durch Erhöhung der Testfälle und der Abschätzung der numerischen Unsicherheiten bereits in der Entwicklungsphase vor dem Erstflug reduziert werden. Des Weiteren ermöglichen verkürzte Rechenzeiten eine stärkere Nutzung von Optimierungsverfahren.

Durch die Vereinheitlichung von Prozessen innerhalb der Airbus Gruppe können die Kosten für Validierung, Wartung und Weiterentwicklung der Prozesskette gesenkt sowie die finanziellen Mittel durch entsprechende Kooperationen zwischen Airbus Divisionen gebündelt und effizient eingesetzt werden. In der Zukunft wird die Vereinheitlichung der Prozesse es erlauben, deren Automatisierung noch effizienter und stärker voranzutreiben.

Die im Projekt erzielten Fortschritte bei der automatisierten Erstellung von Rechennetzen unter Verwendung aktueller Vernetzungssoftware, die Anpassung und Optimierung der Aufbereitung von Simulationsdaten an den Strömungslöser CODA und die FlowSimulator-Rechenumgebung sowie die Entwicklung von Skripten zur Durchführung und Kontrolle von Polarenrechnungen auf den Hochleistungsrechnern von Airbus schaffen eine solide Grundlage zur Erreichung der genannten Ziele. Der neue Löser wurde anhand von Referenzdaten für die H135-Hubschrauberzelle erfolgreich für die Simulation von Polaren validiert und *Best Practices* wurden etabliert. Weitere Maßnahmen zur Reduktion der Rechenzeiten auf Entwickler- und Anwender-Seite sind zwischen den Verbundpartnern über das Ende von DIGIfly hinaus geplant.

A.5 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Für die zuverlässige und genaue Modellierung des flugmechanischen Verhaltens von VTOL-Luftfahrzeugen ist die Bereitstellung aerodynamischer Datensätze bereits in der frühen Entwicklung zwingend notwendig. Aus diesem Grund sind effiziente industrielle Prozesse zur Simulation von Polaren ein wichtiger Bestandteil zur Beschleunigung und Risikominimierung bei neuen Produktentwicklungen.

Die in DIGIfly entwickelten Methoden und Prozesse dienen diesem Zweck und sind zeitnah bei Airbus Helicopters für die industrielle Nutzung verfügbar, die Verwendbarkeit von CODA für CFD-Simulationen von Hubschraubergeometrien wurde erfolgreich nachgewiesen. Zeitpläne zum allgemeinen Übergang von den bisherigen Toolketten auf die neuen Verfahren sind erstellt und sehen - nach weiteren Verbesserungen der Recheneffizienz - eine Einführung für erste Einsatzgebiete im Jahr 2025 vor.

Die transnationale Kooperation der Forschungspartner DLR und ONERA und die gemeinsame Verwendung identischer Verfahren in Deutschland und Frankreich erlauben eine effiziente fortwährende Weiterentwicklung durch die Nutzung von Synergien und Arbeitsteilungen, auch um CODA für die Simulation von rotierenden Komponenten wie Rotoren und Propellern zur industriellen Einsatzreife zu bringen. Im Rahmen laufender und beantragter Projekte erfolgen entsprechende Validierungen für isolierte Rotoren und Komplettkonfigurationen, sowohl für klassische Hubschrauberkonfigurationen als auch für die Demonstratorprojekte wie CityAirbus und Racer, um maximale Flexibilität der Verfahren bei der Simulation innovativer Architekturen zu gewährleisten.

A.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen dieses Vorhabens arbeitete die Airbus Helicopters Deutschland GmbH mit den folgenden Forschungseinrichtungen und Industriepartnern als Verbundpartner intensiv zusammen. Eine darüber hinaus gehende Zusammenarbeit mit Dritten über Unteraufträge fand nicht statt.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Neben der grundsätzlichen Unterstützung von Airbus Helicopters bei der Nutzung und Validierung von CODA seitens der DLR-Entwickler erfolgte eine enge Zusammenarbeit insbesondere bei der Entwicklung von Interface-Implementierungen zur Konvergenzkontrolle in AP3.2 sowie dem Testen des neu implementierten inkompressiblen Lösers in CODA anhand eines industriellen Testfalls in HAP4.

Airbus Operations GmbH

Die Bearbeitung der DIGIfly-Arbeitspakete wurde maßgeblich unterstützt durch den intensiven Austausch mit den CODA-Entwicklern und -Anwendern bei Airbus Operations. Dies betraf die industrieinterne Abstimmung hinsichtlich neuer Vernetzungsverfahren in AP1.3 ebenso wie die Bereitstellung jeweils aktueller CODA-Releases und Hilfestellung bei der Installation von Entwicklungsversionen innerhalb der Airbus-Rechenumgebung. Ein Schwerpunkt der Zusammenarbeit lag auf dem Erfahrungsaustausch zur Nutzung von CODA und der Entwicklung von Best Practices im Rahmen der Validierung und Evaluierung in HAP4.

B. Ergebnisse des Forschungsvorhabens

HAP1 Fortschrittliche CFD Module

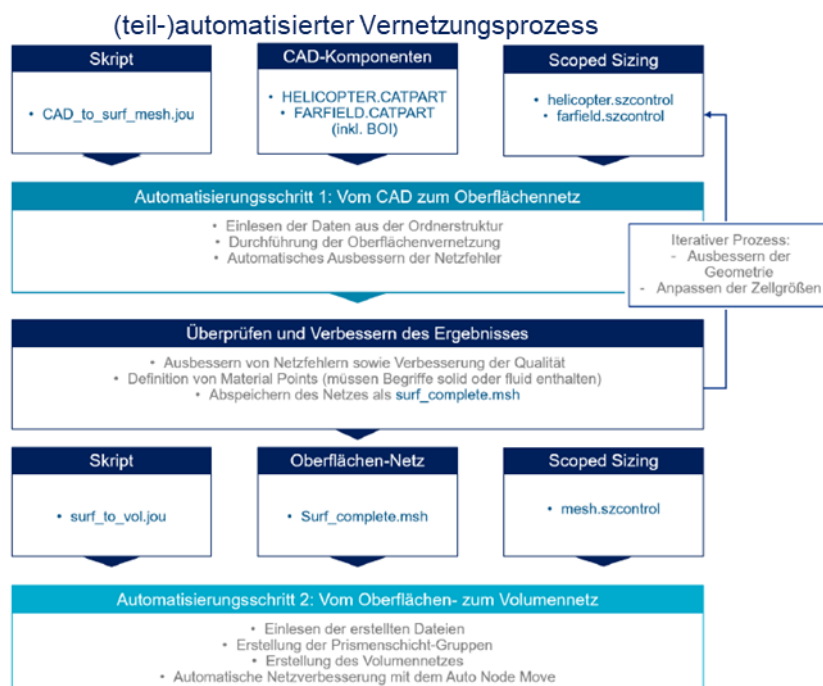
AP 1.3 Flexibilisierung Netzstrategien

Um bisherige, seitens der Software-Anbieter nicht mehr durch Weiterentwicklungen unterstützte und zeit-ineffiziente Vernetzungsmethoden insbesondere für komplexe Geometrien für die industrielle Anwendung zu ersetzen, stand die Untersuchung moderner Verfahren im Vordergrund des AP1.3.

Zu diesem Zweck erfolgten Vernetzungstests und der Vergleich kommerzieller Software für die unstrukturierte Vernetzung (Tetra / Prism) von Hubschraubergeometrien. Dabei wurden verschiedene Ansätze zur Ermittlung eines robusten Arbeitsablaufs für den Vernetzungsprozess verfolgt. Zur Erhöhung der Effizienz wurden geeignete Prozessschritte mittels sogenannter ‚Vorlagen‘ und/oder Fluent Meshing Journal-Skripten automatisiert.

Ausgehend von einer Analyse und Anpassung des ursprünglich manuellen Vernetzungsprozesses erfolgte eine schrittweise Übertragung auf entsprechende Skripte. Wie in untenstehendem Flussdiagramm dargestellt, wurde der Gesamtprozess dabei unterteilt in

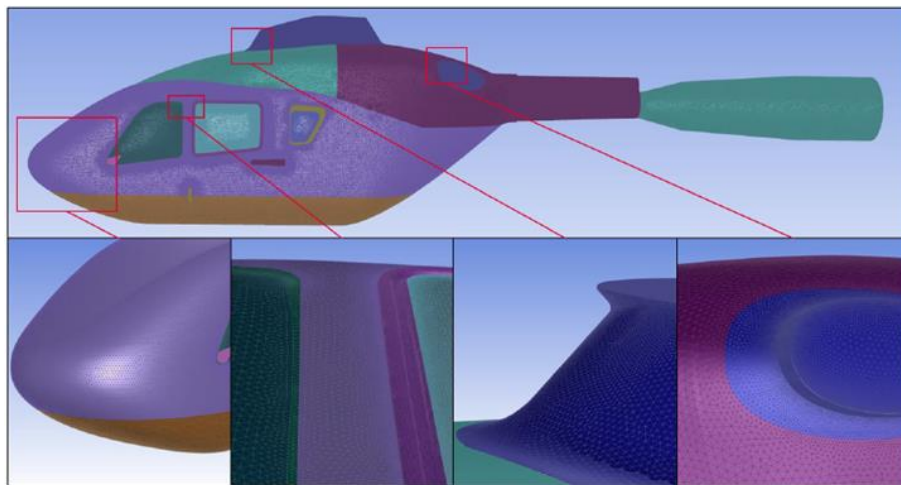
- die automatisierte Erstellung eines initialen Oberflächennetzes
- die Überprüfung der Oberflächennetzqualität und gegebenenfalls manuelle Verbesserung der Geometrie und/oder des Netzes durch den Anwender
- die automatisierte Erstellung des Volumennetzes samt Prismenschichten und lokalen Netzverfeinerungsregionen



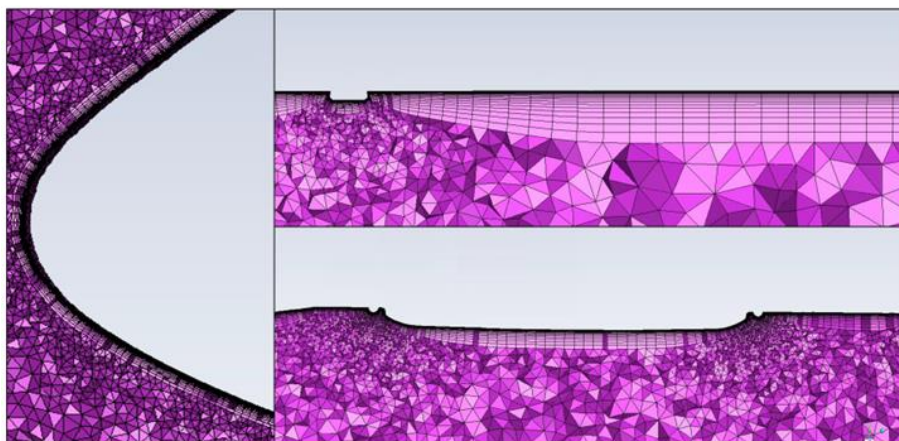
Dieser neu erstellte teil-automatisierte Vernetzungsprozess wurde anschließend anhand von zwei Testfällen unterschiedlicher geometrischer Komplexität (H135 ADHeRo Windkanalgeometrie mit und ohne Landekufen) getestet. Die erzeugten Rechenetze wurden zunächst hinsichtlich der relevanten Netz-Qualitätskriterien bewertet, mit dem Ergebnis, dass diese alle industriell definierten Anforderungen erfüllen. Auch die Ergebnisse von, im nächsten Schritt mit diesen Netzen durchgeführten, Strömungssimulationen zeigen eine gute Übereinstimmung zu Windkanalmessungen und bisherigen Simulationsergebnissen.

Die nachfolgenden Detailansichten zeigen exemplarisch die gute Qualität der mit dem neuen Prozess erzeugten Oberflächen- und Volumennetze insbesondere an geometrischen Übergängen.

Oberflächennetz H135 Zelle ohne Landekufen



Detailansichten des Volumennetzes



Die Implementierung erlaubt eine deutliche Reduktion der Arbeits- und Wartezeit des Anwenders durch die vollständige Automatisierung bestimmter Arbeitsschritte sowie die Bündelung der manuell durch den Anwender durchgeführten Aktivitäten zwischen Oberflächennetz- und Volumennetz-erstellung. Die vorherige, rein manuelle Vernetzung erforderte hingegen eine regelmäßige Interaktion des Nutzers mit der Software über die gesamte Vernetzung hinweg.

Die diesbezügliche Zielsetzung innerhalb des DIGIfly-Projektes konnte mit der erfolgreichen Implementierung und Evaluierung einer teilautomatisierten Prozesskette vollständig erreicht werden. Gleichzeitig wurde Potenzial für künftige Weiterentwicklungen identifiziert: Dies betrifft zum einen eine verbesserte Einbindung der Spezifikation der Netzfeinheit durch den Anwender, zum anderen eine Flexibilisierung bezüglich numerischer Randbedingungen und mehrerer Rechengebiete (Multi-Domain).

Zudem erfolgte ein durchgängiger Austausch innerhalb der Airbus Group bezüglich der zukünftigen Vernetzungsstrategien in den unterschiedlichen Divisionen. In diesem Zusammenhang wurde eine weitere Software bei Airbus Helicopters installiert und im Rahmen einer sechsmonatigen Testlizenz anhand der in DIGIfly als Anwendungsfall definierten ADHeRo Windkanalgeometrie in drei unterschiedlichen Komplexitätsgraden (siehe Bild unten) evaluiert.



Die Geometrievernetzung erfolgte mit den zur Verfügung stehenden Volume-to-Surface und Surface-to-Volume Ansätzen. Zudem wurden die unterschiedlichen Funktionen zur Verbesserung der Netzqualität (kartesisches Hintergrundgitter, anisotrope Zellen) bzw. des Vernetzungsprozesses (Automatisierbarkeit via Python Schnittstelle) untersucht und bewertet.

Mit den durchgeführten Aktivitäten wurde der zugehörige Meilenstein „Neue, moderne, automatisierte Vernetzungsverfahren für Hubschrauber relevante Geometrien getestet“ vollumfänglich erreicht.

HAP3 Prozessautomatisierung

AP 3.2 FlowSimulator-Einbindung & Schnittstellen

Die Nutzung der FlowSimulator/CODA-Umgebung im industriellen Kontext bei Airbus Helicopters erfordert den Aufbau von Know-How bei der Implementierung, Modifikation und Nutzung der einzelnen Software-Bausteine. Entsprechend stand zunächst die vertiefte Einarbeitung und Dokumentation der verfügbaren Parameter und Module im Vordergrund. In diesem Rahmen wurde den Nutzern bei Airbus Helicopters unter anderem eine Dokumentation der CODA-Benutzerschnittstelle bereitgestellt.

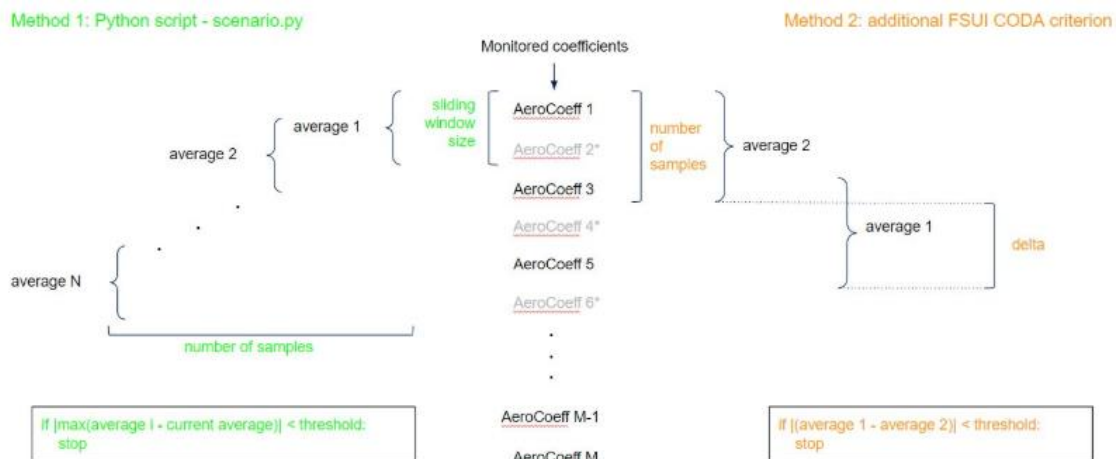
Im Projektverlauf wurde eine regelmäßige, automatisierte Bereitstellung neuer Versionen dieser Schnittstelle bei Airbus Helicopters durch den Partner Airbus realisiert, zudem erfolgte eine lokale Installation des FlowSimulators u.a. zur Nutzung der existierenden Auswertemodule. Das FlowSimulator-Modul FSPostProc konnte

damit auch bei Airbus Helicopters zur Oberflächenintegration von Beiwerten definierter Komponenten verwendet werden - alternativ zu den Monitoring-Ausgaben zur Laufzeit von CODA.

Um von der Erfahrung der Projektpartner und existierenden Implementierungen von FlowSimulator-Modulen, Prozessen und Tools zur effizienten Erzeugung von aerodynamischen Datensätzen zu profitieren, erfolgte ein regelmäßiger Austausch innerhalb des Verbunds. Im Projektverlauf wurden in Form von Workshops und Arbeitsgruppen zu hubschrauberbezogenen Anwendungen, zur Polarengenerierung, aber auch zur Modellierung und Simulation von Rotoren Herangehensweisen, Erfahrungen und Anforderungen diskutiert, um weitestgehend einheitliche Schnittstellen zu schaffen.

Unterschiedliche Methoden, um Beiwerte und Konvergenzverläufe zu extrahieren, unter Berücksichtigung der speziellen Erfordernisse bei Airbus Helicopters hinsichtlich des instationären Verhaltens abgelöster Strömungen, wurden verglichen und bewertet, vor allem hinsichtlich der Möglichkeit, die Auswertung per Skripten zu (teil-) automatisieren. Der verfolgte Ansatz zur Teilautomatisierung der Konvergenzerkennung entspricht einem gleitenden Durchschnitt für die relevanten aerodynamischen Beiwerte und Komponentenlasten. Dabei werden die Werte nicht nur zum Ende der Simulation über eine vorgegebene Anzahl von Recheniterationen sondern fortlaufend gemittelt und ein Konvergenzkriterium wird auf den Mittelwert angewandt. Zwei verschiedene Implementierungen wurden diesbezüglich getestet:

- Python-Skript, welches überprüft, ob eine vorgegebene Anzahl von Mittelwerten innerhalb einer benutzerdefinierten Bandbreite liegt
- Implementierung in FSUI-CODA zum Vergleich zweier Durchschnittswerte mit spezifiziertem Abstand an Iterationen



Im weiteren Projektverlauf erfolgte die Anwendung und Evaluierung dieser Methodik unter Zuhilfenahme der erwähnten unterschiedlichen Auswerteverfahren. Durch Co-Processing und das Stoppen des Strömungslösers bei detektierter Konvergenz konnten die Simulationszeiten je nach Anwendungsfall um bis zu 30% gesenkt werden. Die neu entwickelten Konvergenzchecks wurden schließlich ins Repository für die CODA-Entwicklung übernommen.

Mit den lokalen, aktuellen FSUI-CODA- und FlowSimulator-Installationen bei Airbus Helicopters und der Anbindung an das Airbus High Performance Computing (HPC) sind alle existierenden Module und Funktionalitäten industriell verfügbar. Neue Skripte hinsichtlich einer effizienten Polarenberechnung durch Reduktion der Iterations- und Rechenzeiten wurden implementiert. Es wurden die Möglichkeiten geschaffen sowie Kompetenzen erworben, um Software-Änderungen für die (Weiter-)Entwicklung von Toolketten vorzunehmen.

HAP4 Demonstration an Use Cases

AP 4.1 Use Case Definition

HAP4 stellte den Schwerpunkt der Aktivitäten bei Airbus Helicopters innerhalb des DIGIfly-Projekts dar. Als eine der ersten Aufgaben ergab sich die Spezifikation von Anwendungsfällen und damit einhergehend die Formulierung industrieller Erwartungen und Erfordernisse mit Blick auf die Anwendungsszenarien. Als industrielle Testfälle wurden folgende Geometrien ausgewählt:

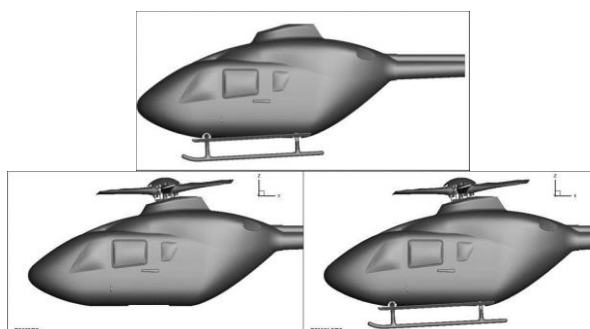
(1) H135-Zelle

- Loft-Geometrie eines H135-Hubschraubers, im Rahmen des LuFo-Projekts TOSCANA bereits mit den Verbundpartnern DLR und Airbus geteilt
- Anwendung auf rein CFD-basierte Polarengenerierung: Optimierung des Setups für reduzierte Rechenzeiten und Automatisierung (Konvergenzkontrolle, Lastenextraktion)

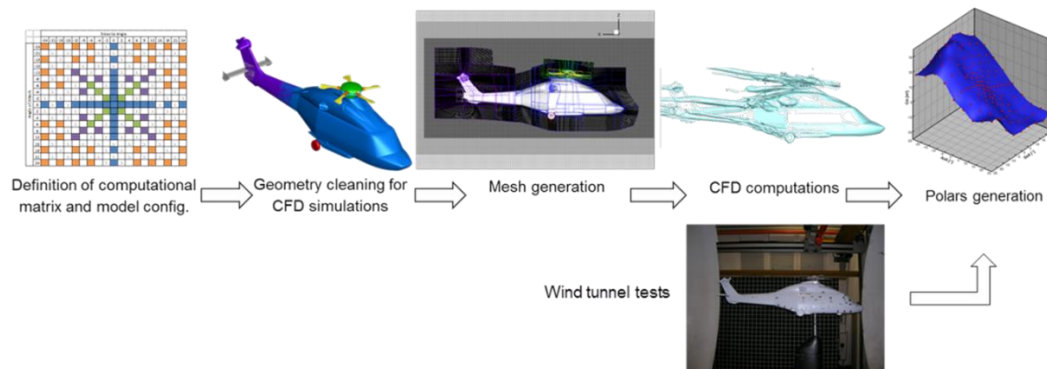


(2) ADHeRo-Windkanalmodell

- 1:5 H135-Rumpf (ohne Heckausleger), Konfigurationen unterschiedlicher Komplexität mit und ohne Landekufen und Rotorkopf
- Umfangreiche Messdaten aus dem EU-Projekt CleanSky im Windkanal der TU München, Anstell-/Schiebewinkelbereich $-10^\circ \leq \alpha, \beta \leq 10^\circ$
- Testfall zur Untersuchung und Implementierung von Datenfusions-Ansätzen und Vernetzungsmethoden



Neben der Entwicklung neuer Vernetzungsansätze (AP 1.3) sollte als Anwendung eine weitestgehend automatisierte Prozesskette zur Erzeugung aerodynamischer Datensätze entwickelt und validiert werden, basierend auf FlowSimulator und CODA. Auch das Fusionieren numerischer und/oder experimenteller Daten aus unterschiedlichen Quellen sollte dabei berücksichtigt werden, wie in untenstehendem Diagramm dargestellt.

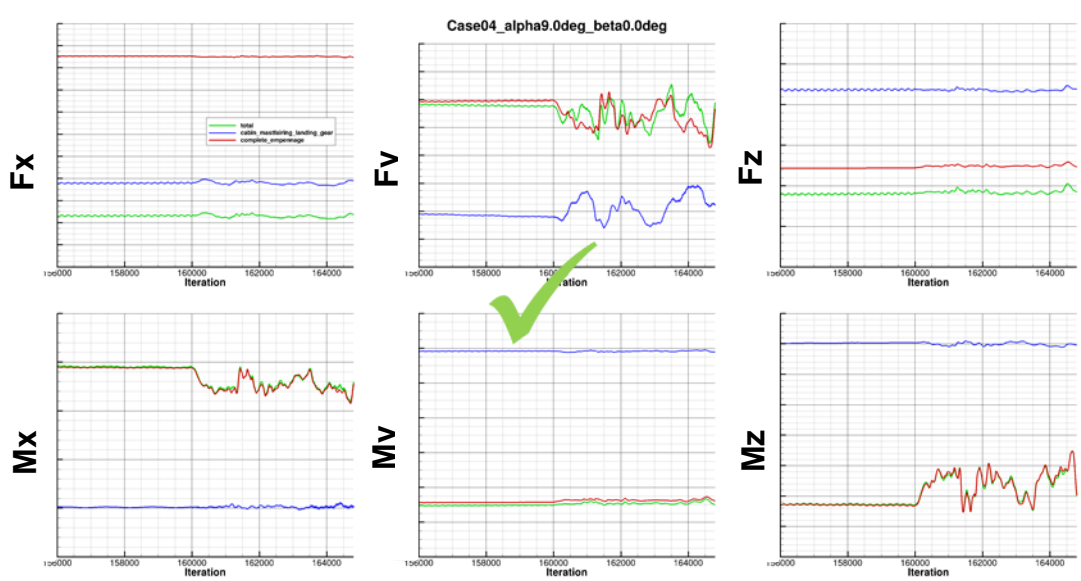


Die größte Herausforderung bei der Erstellung eines in sich konsistenten aerodynamischen Datensatzes ist die Aufbereitung und Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichen Quellen, Airbus Helicopters hat dazu aktuell ein einfaches Gewichten der Ausgangsdaten innerhalb eines Python-Tools implementiert. In diese Gewichtung können unter anderem Faktoren zur Zuverlässigkeit von Rohdaten einfließen. Ziel in DIGIfly war die Definition eines robusten, allgemeingültigen Vorgehens zur Bestimmung der Gewichtungsfunktionen.

Die Anwendbarkeit höherwertiger Ansätze (etwa Multi-Fidelity- oder Surrogate-Methoden) wurden innerhalb der Airbus Group und mit den Verbundpartnern diskutiert, um auch die Effizienz der Polarengenerierung zu erhöhen, z.B. durch eine reduzierte Anzahl hochgenauer Rechenpunkte, ergänzt durch Windkanaldaten oder Ergebnisse recheneffizienterer Verfahren.

Die Verwendung experimenteller und numerischer Rohdaten erfordert generell die Überprüfung ihrer Genauigkeit, Konsistenz und physikalischen Plausibilität. Insofern sind eine Konvergenzkontrolle von CFD-Rechnungen sowie die Einhaltung physikalischer Gesetzmäßigkeiten (Symmetrien, Linearitäten, bekannte Skalierungseffekte etwa über die Reynoldszahl) integraler Bestandteil der Polarengenerierung. Untenstehende Abbildung zeigt exemplarisch den Konvergenzverlauf einer instationären Rechnung eines Hubschrauberrumpfes für die auf unterschiedliche Komponenten wirkenden Kräfte und Momente. Jede der dargestellten Kurven wird in einem solchen Fall hinsichtlich einer hinreichenden Konvergenz (ggf. des Mittelwertes) geprüft.

Um die Vorgehensweise bei der Erstellung aerodynamischer Datensätze / Polaren zu verbessern und entsprechende Prozesse unter Berücksichtigung der auf numerischer Seite neuen Rechentools zu definieren und zu implementieren, wurde eine umfangreiche Bestandsaufnahme und Analyse sämtlicher auf industrieller Seite bestehender Windkanalergebnisse durchgeführt und in einem technischen Bericht dokumentiert.



Die wesentlichen Erkenntnisse / Schlussfolgerungen insbesondere in Bezug auf den Einfluss der Reynoldszahl auf Windkanalergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit Modellskalen zwischen 1:2.5 und 1:9 sowie begrenzten Windkanalgeschwindigkeiten bis zu 60m/s ergibt sich eine deutliche Diskrepanz von bis zu einem Faktor 10 zwischen den Messungen und dem Freiflug hinsichtlich der Reynoldszahl
- Der Ansatz, mittels Trendlinien Widerstandsbeiwerte aus dem Windkanal auf Freiflugbedingungen zu extrapolieren, zeigt zwischen unterschiedlichen Konfigurationen keine universell gültigen Gesetzmäßigkeiten
- Für den projektintern gewählten Fall des ADHeRo-Modells zeigen sich die größten Reynoldszahl-Abhängigkeiten für das Landewerk und den Rotorkopf, nicht beschränkt auf den Widerstand; im Allgemeinen ist eine hohe Re-Abhängigkeit auch der in dieser Konfiguration nicht berücksichtigten Leitwerke zu erwarten

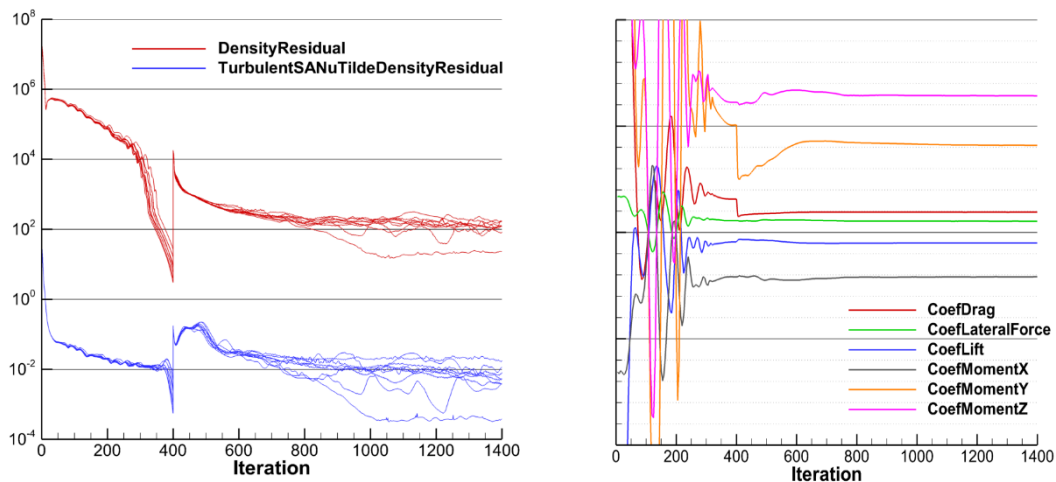
Der erstellte Bericht gibt Empfehlungen zur Zusammenführung von experimentellen und numerischen Daten sowie Best Practices für die Durchführung von Windkanal- oder CFD-Kampagnen. Eine gemeinsame Verwendung von Daten aus beiden Quellen wird auf Komponenten- oder Flugbereichsbasis empfohlen – unter Beachtung der genannten Reynoldszahleffekte.

Jenseits dieses Themas der Zusammenführung von Daten bei der Erzeugung aerodynamischer Datensätze wurde in Bezug auf den in DIGIfly geplanten inkompressiblen Löser in CODA mit dem DLR vereinbart, die H135-Zelle als Testfall zu verwenden. In Abstimmung mit den Partnern DLR und Airbus hinsichtlich eines zusätzlichen generischen Testfalls wurde als gemeinsamer, gängiger und öffentlich zugänglicher Fall ein Ahmed-Körper definiert.

AP 4.2 Simulationen

Basierend auf den Ergebnissen des vorigen LuFo-Projekts TOSCANA wurde der in AP4.1 definierte Rechenfall der isolierten H135-Zelle in DIGfly fortgesetzt und vertieft hinsichtlich Robustheit und Konvergenzverhalten für Polarenrechnungen analysiert. Zudem erfolgte die Portierung des Setups auf die aktuelle CODA-Version.

Die verwendeten numerischen Parameter zeigten ein robustes Verhalten für die zunächst mit CODA berechneten Anstell- und Schiebewinkelkombinationen im relevanten Vorwärtsflugbereich. Die Fälle zeigten ein akzeptables Konvergenzverhalten bezüglich der Dichteresiduen (Abnahme um zwei bis drei Größenordnungen) und der globalen Kraft- und Momentenbeiwerte, was eine Mittelung der Lasten über die letzten Iterationen erlaubte. Letzteres ist unten rechts beispielhaft für einen der Rechenfälle dargestellt.

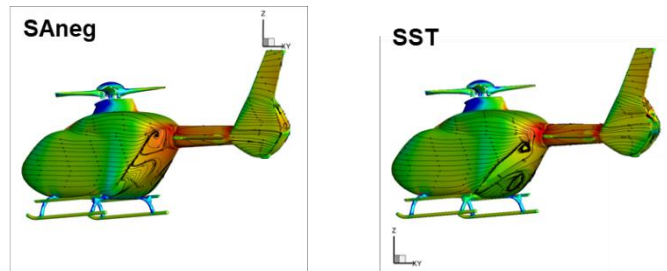


Anschließend wurde die Verwendung von Cauchy-Kriterien zur automatischen Konvergenzkontrolle aller relevanten Komponentenlasten (vgl. AP3.2) getestet, sowie höhere Winkelbereiche mit großskaligen Strömungsablösungen in die Untersuchungen eingeschlossen. Nicht zuletzt wurden weitere Parameterstudien durchgeführt, um die Rechenzeiten bei beizubehaltender Genauigkeit der Ergebnisse und Robustheit zu optimieren.

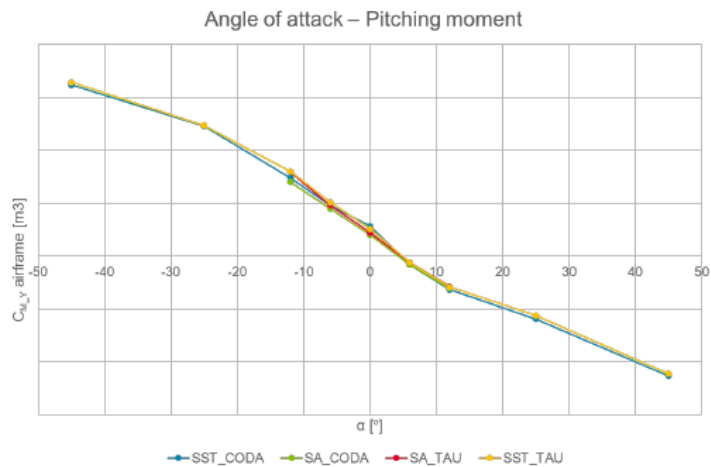
Ein Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen lag auf

- der Simulation für unterschiedliche Anströmbedingungen, einschließlich hoher Anstellwinkel (bis $\pm 45^\circ$), um Konvergenzverhalten und Robustheit im gesamten relevanten Polarenbereich zu erproben
- der Verwendung unterschiedlicher Turbulenzmodelle, einschließlich des während des Projektzeitraumes implementierten, höherwertigen 2-Gleichungs SST-Modells, welches dem industriellen Standard bei Airbus Helicopters entspricht
- verschiedenen Methoden der Wiederanrechnung, basierend auf Lösungen bereits simulierter Punkte, um die Gesamtrechenzeit bei der Polarengenerierung ggf. zu reduzieren

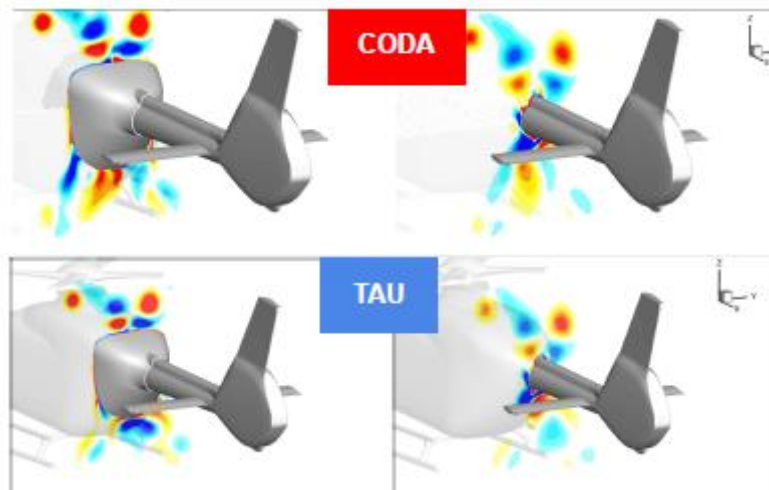
Leider konvergierten nicht alle Rechnungen zufriedenstellend, zudem wurden Probleme bei der Ausgabe der Lastenkomponenten im Falle von Restarts identifiziert. Der Hauptunterschied in den Strömungslösungen bei Verwendung des SAneg- bzw. SST-Turbulenzmodells lag erwartungsgemäß in der Berechnung abgelöster Strömungen, wie sie bei Hubschraubern mit Heckbeladbarkeit wie der in DIGfly betrachteten H135 auftreten. Dies zeigt auch die Visualisierung des Heckbereichs anhand von Oberflächen-Stromlinien und Druckverteilung:



Die Auswertung der Simulationen hinsichtlich Nick- bzw. Giermoment für unterschiedliche Anstell- und Schiebewinkel und der Vergleich mit Lösungen des Strömungslösers TAU zeigte in der Tendenz eine gute Übereinstimmung, abgesehen von hohen Schiebewinkeln (siehe Darstellung unten).



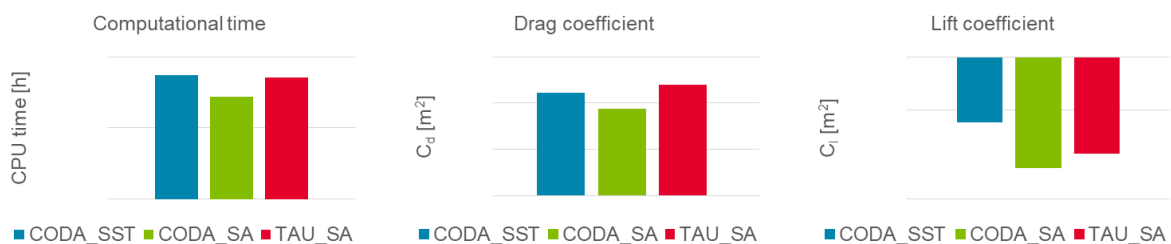
Zusätzlich wurden detaillierte Vergleiche zwischen CODA und TAU anhand implementierter Postprocessing-Skripte für CODA-Lösungen zur Visualisierung von integrierten Beiwerten und Strömungsfeldern durchgeführt. Die Rechenzeiten von CODA lagen für eine vollständige, stationär gerechnete Polare mit $k-\omega$ SST Turbulenzmodell und auf identischen Netzen in gleicher Größenordnung wie diejenigen von TAU. Solche fortlaufenden Vergleiche und Validierungen dienen in der Folge als Basis für die industrielle Evaluierung in AP4.3.



AP 4.3 Evaluierung & Best Practice

Im Vordergrund der Tätigkeiten in AP4.3 stand die Evaluierung der CFD-Simulationen. Für die industrielle Anwendung relevant sind neben der physikalischen Genauigkeit die Recheneffizienz, die Robustheit und das Konvergenzverhalten des Strömungslösers. Hierzu erfolgen umfangreiche Studien in AP4.2 - die Bewertung erfolgte vor allem durch den Vergleich mit Ergebnissen des bislang auf Industrieseite für die betrachteten Anwendungsfälle genutzten CFD-Lösers TAU.

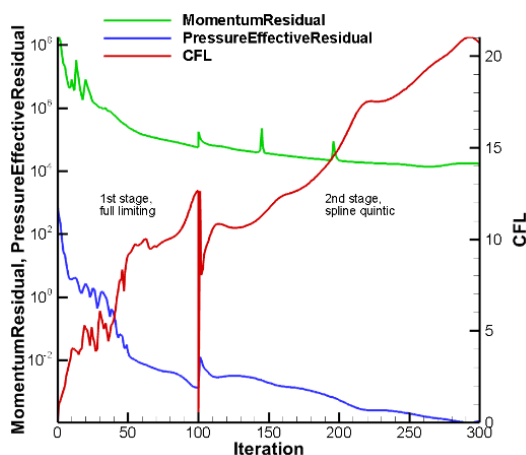
Das untenstehende Beispiel zeigt, dass der neue Löser – in diesem Fall abhängig vom verwendeten Turbulenzmodell – vergleichbare stationäre Lösungen bei ähnlicher Rechenperformance liefert. Die beobachtbaren Unterschiede in den aerodynamischen Beiwerten sind aufgrund unterschiedlicher Numerik erwartbar, wenn auch noch nicht vollständig verstanden. Hervorzuheben bezüglich des Rechenzeitvergleichs ist dabei, dass durch die unterschiedliche interne Diskretisierung der beiden CFD-Codes die Anzahl der Freiheitsgrade trotz bzw. gerade aufgrund der Verwendung identischer Ausgangs-Gitter bei CODA deutlich höher liegt, das heißt eine höhere räumliche Auflösung erreicht wird.



Zusammenfassend führt die Evaluierung des neuen Strömungslösers CODA zum Ende von DIGfly auf folgende Schlussfolgerungen und allgemeine Best Practices:

- Existierende TAU-Rechnernetze, welche die industriellen Qualitätsstandards erfüllen, können grundsätzlich ohne Anpassungen für CODA-Rechnungen genutzt werden
- Generell ist eine hohe Genauigkeit der Strömungslösungen mit CODA verglichen mit den Referenzergebnissen mit dem Löser TAU zu beobachten – insbesondere unter Beachtung der signifikanten Unterschiede der numerischen Verfahren und Diskretisierung durch den zell-zentrierten Ansatz
- Die CODA-Rechenzeiten stationärer Rechenpunkte, um eine Konvergenz der aerodynamischen Beiwerte zu erreichen, liegen in Abhängigkeit der verwendeten numerischen Parameter, Netze und Netzqualitäten noch über denen der Referenzmethoden und erfordern daher weitere Optimierungen
- Ein Satz numerischer, nicht hinsichtlich Rechenzeiten optimierter Parameter wurde definiert, mit welchem eine gute Robustheit und Rechengenauigkeit für alle Rechenpunkte, einschließlich hoher Anstell- und Schiebewinkel erzielt werden konnte

Zu Projektende stehen seitens des CFD-Codes noch einige Komponenten aus, die eine zusätzliche Effizienzsteigerung für die betrachteten Use Cases erwarten lassen. Dies betrifft zum einen ein Multigrid-Verfahren zur Konvergenzbeschleunigung. Zum anderen wurde im Verlauf von DIGfly seitens des DLR ein inkompressibler Löser entwickelt und in einer ersten Prototypenversion auf den H135-Rechenfall von Airbus Helicopters angewandt. Rechnungen mit Genauigkeit erster Ordnung konnten dabei erfolgreich durchgeführt werden, wie unten dargestellt, der Löser erfordert jedoch noch Verbesserungen bezüglich Robustheit und Konvergenzbeschleunigungsverfahren, um tatsächlich Vorteile im Vergleich mit dem kompressiblen Löser zu bieten.



Bezüglich des untersuchten Polarengenerierungsprozesses wurden folgende Erkenntnisse gewonnen bzw. Ergebnisse erzielt:

- Ein vereinfachtes, standardisiertes Verfahren zum Zusammenführen von numerischen und experimentellen Daten für stark abgelöste Strömungszustände um Hubschraubergeometrien wurde nach einer umfangreichen Studie und dem Vergleich verfügbarer Daten und Literatur als nicht realisierbar bewertet
- Skripte und Toolketten zum nutzerfreundlichen Abschicken von Rechenjobs und der Aufbereitung von CFD-Daten sowie automatisierten Konvergenzüberwachung wurden entwickelt. Eine Weiterentwicklung und Tuning letztgenannter Verfahren zur effektiven Reduktion der Polarenrechenzeiten wird als erforderlich erachtet
- Mehrere Polarenpunkte innerhalb eines Rechenjobs zu rechnen, ergab in Bezug auf Konvergenzverhalten und Rechenzeiten keinen deutlichen Vorteil gegenüber Einzelrechnungen
- Da die Zeit für die CFD-Simulationen den Hauptanteil an der benötigten Zeit für die Polarengenerierung ausmacht, ist eine weitere Verkürzung der CODA-Rechenzeiten notwendig. Verbesserungen auf Softwareseite ebenso wie die Weiterentwicklung der in DIGIfly gewonnenen Best Practices werden nach Projektende fortgeführt

Im Projektverlauf konnte seitens Airbus Helicopters ein deutlicher Fortschritt in Bezug auf Kompetenzen rund um die Entwicklung und Nutzung von FlowSimulator und CODA erzielt werden. Der Austausch und die Zusammenarbeit mit den Software-Entwicklern und den Forschungsinstituten wurde intensiviert und Arbeitsgruppen zu spezifischen technischen Aspekten initiiert, welche über DIGIfly hinaus fortgeführt werden.

AP 4.4 Einbindung in industrielle Prozesse

Im vorliegenden Arbeitspaket wurde sichergestellt, dass die Prozesse, welche basierend auf den durchgeführten Validierungen in HAP4 eine ausreichende Effizienz und Qualität haben, durch ggf. notwendige kleinere Anpassungen und eine saubere Dokumentation nach Projektende zeitnah in die Entwicklungstätigkeiten von Airbus Helicopters überführt werden können.

Voraussetzung für die Integration in die industrielle Arbeitsumgebung ist die uneingeschränkte Nutzbarkeit des FlowSimulators und von CODA für die Endanwender. Zu diesem Zweck wurden unter anderem Jobskripte entwickelt, um Polarenrechnungen mit CODA auf den HPC-Clustern in Anlehnung an bestehende Prozesse durchzuführen und so den Anwendern den Umstieg von bestehenden Strömungslösern zu erleichtern. Durch die Anpassung von Pre- und Post-Processing Skripten können die resultierenden Oberflächenlösungen und aerodynamische Koeffizienten basierend auf dem CODA-Output aufbereitet und ausgegeben werden.

Die im Vorgängerprojekt TOSCANA erstmalig erstellte Roadmap zur mittel- bis langfristigen Industrialisierung von CODA wurde basierend auf den in DIGIfly gewonnenen Erkenntnissen zum Entwicklungs- und Validierungsstand der Software weiter detailliert und an den Arbeitsfortschritt angepasst. Die industrielle Nutzung des neuen Lösers für (Polaren-)Rechnungen der isolierten Hubschrauberzelle, welche im Fokus des laufenden Projektes stand, ist im Laufe des Jahres 2025 geplant.

Annex 1

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

AHD	Airbus Helicopters Deutschland GmbH
CFD	Computational Fluid Dynamics
CODA	Neuer CFD-Code in Kooperation von Airbus, DLR, ONERA
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FLOWer	Strukturierter Strömungslöser des DLR
H135	Hubschraubermuster
HPC	High Performance Computing
TAU	Unstrukturierter Strömungslöser des DLR
VTOL	Vertical Takeoff and Landing