

# ENTWICKLUNG UND AUFBAU DES DHBW HUBSCHRAUBER FLUGSIMULATORS

T. Mannchen

Duale Hochschule Baden-Württemberg, Ravensburg, Campus Friedrichshafen,  
Fallenbrunnen 2, 88045 Friedrichshafen, Deutschland

## Zusammenfassung

Der Hubschrauber Flugsimulator des Campus Friedrichshafen der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Ravensburg basiert auf einem Original Hubschrauber des Typs BO105. Im Zuge der Entwicklung des Flugsimulators wurden die Triebwerke, der Rotor und das Hauptgetriebe sowie der Heckausleger des Hubschraubers entfernt. Die Hubschrauber-Zelle, das Cockpit, die Sitze, die Piloten-Steuerhebel und das Steuergestänge dagegen wurden im Original beibehalten.

Zur Entwicklung des Sichtsystems wurde zunächst ein 3D-CAD Modell des Hubschraubers erstellt, mit dessen Hilfe das Sichtfeld der Piloten untersucht wurde. Daraus konnte als Anforderung eine sphärisch gekrümmte Projektionsfläche mit einer azimuthalen Abdeckung von  $210^\circ$  sowie einer Sicht nach vorne und nach unten abgeleitet werden. Basierend auf dieser Anforderung wurde eine Projektionsfläche konstruiert und in Faserverbundbauweise hergestellt. Das simulierte Sichtfeld wird durch nahtlose Überlappung von sechs Projektionen erzeugt.

Die Simulation basiert auf einem Cluster von Computern mit der Flugsimulationssoftware X-Plane, welche in einer Master-Slave-Architektur arbeiten. In X-Plane wurde ein für die BO105 angepasstes flugmechanisches Modell implementiert. Zur Übertragung der Piloten-Kommandos an die Flugsimulation wurden die Piloten-Steuerhebel mit Positionssensoren ausgestattet und an X-Plane angebunden. Die ursprüngliche Hubschrauber-Verkabelung wurde ersetzt, so dass alle Schalter im Cockpit inklusive der Piloten-Steuerhebel und des Overhead-Panels in der Simulation zur Verfügung stehen.

Das Cockpit wurde einer „Glass-Cockpit Konvertierung“ unterzogen, indem die ursprünglichen Rundinstrumente durch Bildschirme ersetzt wurden, welche von X-Plane angesteuert werden. Das Design und Layout der digitalen Instrumente wurde an das moderner Glass-Cockpit Hubschrauber angelehnt.

In einer Pilotenevaluation mit verschiedenen Flugmanövern wurde festgestellt, dass die Flugeigenschaften der Realität sehr ähnlich sind und dass „man sich vom Gefühl her im echten Fluggerät wiederfindet“. Mit dem Hubschrauber Flugsimulator steht damit eine hochwertige und anpassbare Entwicklungsplattform für Simulationen und Untersuchungen im Bereich Flugsimulation, Flugregelung, Missionssimulation sowie für Cockpit- und Mensch-Maschine-Schnittstelle Entwicklungen zur Verfügung.

## Keywords

Luffahrt; Hubschrauber; Flugsimulation; Mensch-Maschine-Schnittstelle

## 1. MOTIVATION

Die Motivation zur Entwicklung des Flugsimulators besteht aus drei Aspekten. Zum einen wird angestrebt, den Hubschrauber Flugsimulator in der Lehre des Studiengangs Luft- und Raumfahrttechnik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Ravensburg am Campus Friedrichshafen einzusetzen. Die DHBW kooperiert im Bereich der Luft- und Raumfahrt eng mit industriellen und institutionellen dualen Partnern, neben Herstellern und Zulieferern auch mit dem DLR, der Bundeswehr, Betreibern von Luftfahrzeugen sowie einer Vielzahl von KMUs. Dafür soll als zweite Motivation mit dem Flugsimulator eine Plattform geschaffen werden, auf deren Basis anwendungs- und transferorientierte kooperative Forschung durchgeführt werden kann. Darüber hinaus dient das Projekt als dritter Aspekt auch als Themengeber für eine Vielzahl von Studienarbeiten für Studierende, nicht nur der Luft- und Raumfahrttechnik, sondern in interdisziplinären Teams auch aus der Elektrotechnik/Nachrichtentechnik sowie der Informatik.

## 2. EINFÜHRUNG

### 2.1. Hubschrauber MBB BO105

Die BO105 [1] ist ein zweimotoriger leichter Mehrzweckhubschrauber der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB). In der BO105 (Erstflug 1967) wurde erstmals ein *gelenkloses* Rotorsystem eingesetzt, bei dem die bisher üblichen Schwenk- und Schlaggelenke unter Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) durch mechanisch flexible Rotorblattwurzeln ersetzt wurden. Das gelenklose Rotorsystem verleiht der BO105 eine besonders gute Steuerbarkeit und die Fähigkeit, aerodynamische Manöver zu fliegen. Die Einsatzzwecke umfassen Luftrettung und Polizei sowie militärische Verwendung als Abwehr-, Aufklärungs- und Verbindungshubschrauber. Die BO105 ist noch heute im Einsatz, wurde jedoch größtenteils durch den Hubschrauber Eurocopter EC135 (Erstflug 1994, heute Airbus Helicopters H135) abgelöst, dessen Entwicklung auf die BO105 zurückgeht und bei dem das Rotorsystem vom *gelenklosen* zum *lagerlosen* Rotor weiterentwickelt wurde.

## 2.2. Flugsimulation

Für einen Piloten in einem fliegenden Fluggerät entsteht die Wahrnehmung des Fliegens durch die Stimulation seiner Sinnesorgane. Um in einer Flugsimulation dieselbe Wahrnehmung wie im realen Flug hervorzurufen, gilt es die Stimulation der Sinnesorgane zu replizieren. Teilweise ist die exakt identische Stimulation im Vergleich zur realen Flugsituation nicht möglich, daher entsteht die Frage, welche der Sinneseindrücke für die Flugsimulation reduziert oder vereinfacht werden können und wie sich dies auf die Wahrnehmung des Fliegens auswirkt.

Unvollständige oder unzureichend aufeinander abgestimmte Sinneseindrücke aus der Simulation können bei dem Piloten jedoch einen unzureichenden Gesamteindruck der Flugsimulation zur Folge haben oder in Extremfällen sogar zu Schweißausbrüchen und Übelkeit führen (der sogenannten *Simulator-Krankheit*) [2].

Die für die Wahrnehmung des Fliegens relevanten Sinneseindrücke sind visuell, mechanisch und akustisch [2]. Die mechanische Wahrnehmung des Menschen umfasst den Vestibularapparat, der lineare Beschleunigungen (inkl. der Fallbeschleunigung) und Winkelbeschleunigungen erfasst, sowie die (passive) taktile Wahrnehmung und die (aktive) haptische Wahrnehmung; letztere sind für die Interaktion des Piloten mit dem Sitz und den Pilotsteuerhebeln relevant.

Die Flugbewegungen im realen Flug können durch eine fest mit dem Boden verbundene Bewegungsplattform mit limitierten Bewegungswegen der Aktuatoren nur eingeschränkt wiedergegeben werden. Unter Ausnutzung des physikalischen Aufbaus des menschlichen Vestibularapparats, der eine frequenzabhängige Charakteristik aufweist, die aus regelungstechnischer Sicht mit einem Filter zweiter Ordnung verglichen werden kann, ist es jedoch möglich, mit einer Bewegungsplattform eine Bewegung zu erzeugen, die eine sehr realitätsnahe Empfindung hervorruft [2].

Bei Flugsimulatoren zum Training von Piloten für Fluggesellschaften bestehen die Zulassungsbehörden auf den Einsatz von Bewegungsplattformen. Dementgegen wird in vielen Simulatoren die überzeugende Empfindung einer Bewegung durch ein gutes Sichtsystem als Argument dafür verwendet, auf ein Bewegungssystem verzichten zu können. Insbesondere bei militärischen Simulatoren wird weitgehend auf eine Bewegungsplattform verzichtet, ermöglicht durch den Einsatz von hochwertigen Sichtsystemen und sogenannten *G-Sitzen*, bei denen Vibrationen und Druck lokal auf den Sitz aufgebracht werden, um den Piloten taktile Wahrnehmungen abgeleitet aus den Flugbeschleunigungen spüren zu lassen [2].

Für den DHBW Flugsimulator wurde zunächst ein Konzept ohne Bewegungsplattform umgesetzt. Ausschlaggebend dafür war neben den erheblichen Mehrkosten, die ein Bewegungssystem verursacht hätte, die bauliche Beschränkung der Raumhöhe, welche die für eine Bewegungsplattform zusätzlich benötigte Höhe nicht gestattete. Es wurde daher in der Entwicklung und der Umsetzung großes Augenmerk auf ein gutes Sichtsystem gelegt, um eine möglichst überzeugende Empfindung der Bewegung in der Flugsimulation zu erreichen. Für eine zukünftige Ausbaustufe wurde die Möglichkeit der Erweiterung des Flugsimulators mit einer Bewegungsplattform jedoch offengehalten.

## 2.3. X-Plane

Als Basis des DHBW Flugsimulators wurde die Flugsimulationssoftware *X-Plane* des Herstellers Laminar Research [3] gewählt. *X-Plane* ist sowohl als Consumer Version für Desktop PCs wie auch als FAA<sup>1</sup> zertifizierbare Professional Version verfügbar. Auch wenn zum jetzigen Zeitpunkt eine Zertifizierung des Flugsimulators nicht geplant ist, wird die Professional Version eingesetzt. Diese Version bietet eine uneingeschränkte Lizenz und zusätzliche Features gegenüber der Desktop Version wie Hardware- und Frame-Rate-Checks sowie Unterstützung von gekrümmten Projektionsflächen.

Die Qualität des Flugmodells von *X-Plane* sowie der Umfang, die Einsatzflexibilität und die Anpassbarkeit der Flugsimulationssoftware machen *X-Plane* zur ersten Wahl für den DHBW Hubschrauber Flugsimulator. Laminar Research [3] bezeichnet *X-Plane* als die weltweit umfassendste und leistungsfähigste Flugsimulationssoftware für PCs mit dem realistischsten verfügbaren Flugmodell. *X-Plane* ist weniger ein Computerspiel (obwohl auch auf heimischen PCs sowie auf mobilen Geräten einsetzbar), sondern ein Ingenieurswerkzeug zur hochgenauen Simulation der Flugmechanik von Flächenflugzeugen und Hubschraubern. *X-Plane* liefert eine Vielzahl vorinstallierter Luftfahrzeuge sowie eine hochauflösende Szenerie mit weltweiter Abdeckung von 74° nördlicher Breite bis 60° südlicher Breite sowie eine Datenbank mit über 34.000 Flugplätzen.

Von großer Bedeutung für den DHBW Flugsimulator ist auch die mitgelieferte Software *Plane Maker* [3], welche sowohl die Neuerstellung sowie die Modifikation von vorhandenen Flugmodellen erlaubt. Von diesem Feature wurde in der Entwicklung des Flugsimulators umfangreich Gebrauch gemacht. Die mit *Plane Maker* erstellten Flugmodelle unterliegen von Seiten Laminar Research keinen Restriktionen, was zu einer breiten Verfügbarkeit unterschiedlicher Flugmodelle in der *X-Plane Community* führt.

Neben der Anpassbarkeit der Flugmodelle erlaubt der ebenfalls mitgelieferte *World Editor* [3] von Laminar Research die Szenerie und Flugplätze zu verändern und zu erweitern. Damit ist eine individuelle Anpassung der Szenerie zur Verwendung für spezifische Einsatzzwecke des Flugsimulators möglich.

## 3. ARCHITEKTUR

Das Rückgrat des Flugsimulators bilden zehn über ein Netzwerk verbundene Rechner, auf denen *X-Plane* in einer Master-Slave-Konfiguration läuft. Die Flugsimulation wird auf dem Master gerechnet, ebenso sind die Steuerhebel der Piloten mit dem Master Rechner verbunden.

Für die Visualisierung werden sechs individuelle Rechner eingesetzt, jeweils mit einer Slave *X-Plane* Instanz und einer individuellen Grafikkarte, die jeweils mit einem individuellen Projektor verbunden sind. Diese Konfiguration weist Performance-Vorteile gegenüber einer ebenfalls denkbaren Lösung auf, in der von einem Rechner mit einer Grafikkarte mehrere Projektoren angesteuert werden. Nachteilig an der gewählten Lösung

<sup>1</sup> Federal Aviation Administration, Bundesluftfahrtbehörde der USA

mit individuellen Rechnern und Grafikkarten kann eine potenzielle Asynchronität zwischen den Visualisierungskanälen sein, was sich als wahrnehmbare Kantensprünge an den Bildübergängen negativ bemerkbar machen könnte. Hierbei handelt es sich um ein generelles Problem nicht synchronisierter Multi-Projektor Simulationen. Dies ließe sich durch (synchronisierte) Grafikkartencluster verbessern, was jedoch mit erheblichen Mehrkosten verbunden wäre. In der Praxis hat sich keine als störend wahrnehmbare Asynchronität herausgestellt, insbesondere führt bei gekrümmter Projektionsfläche mit variablen Übergangsbereichen und Edge-Blending (siehe Kapitel 4.6 Warping/Blending) eine Asynchronität nicht zu Kantensprünge, sondern eher zu leichten zeitlich begrenzten Unschärfebereichen, welche erheblich weniger bis gar nicht wahrgenommen werden.

Das Cockpit im Hubschrauber wird von einem PC gespeist, der die Instrumente sowie die Kartendarstellung erzeugt (siehe Kapitel 6 Glass-Cockpit Konvertierung).

Zwei weitere PCs kommen als Instruktor Arbeitsplatz und zur Darstellung einer Außenansicht zum Einsatz. Diese sind mit weiteren Anzeigen als Operator Station zusammengefasst, von der aus der Betrieb des Simulators gesteuert und überwacht werden kann.

Somit ergibt sich ein geschlossener Kreis: die Piloten steuern über die Steuerhebel den (simulierten) Hubschrauber, die Kommandos werden an den Master Rechner übertragen, auf dem die Flugsimulation gerechnet wird. Die sich ergebene Außensicht wird von den Visualisierungsrechnern erzeugt und dem Piloten auf dem Sichtsystem projiziert, ebenfalls erhalten die Piloten Rückmeldung über die aktuelle Flugsituation über die Cockpit-Instrumente. Von der Operator Station kann auf die Simulation Einfluss genommen werden. BILD 1 zeigt die gesamte Architektur des Flugsimulators.

X-Plane beinhaltet eine Sound-Engine, welche die Fluggeräusche bereitstellt. Für den DHBW Flugsimulator

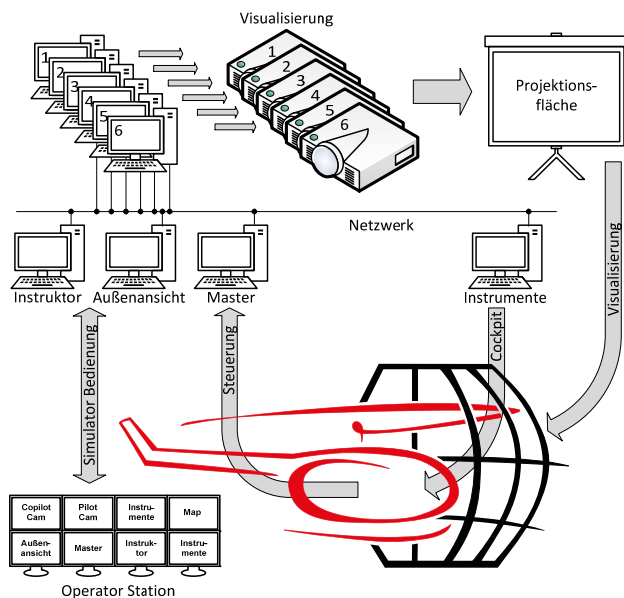


BILD 1. Rechner-Architektur des Flugsimulators mit Master zur Rechnung der Flugsimulation, Visualisierung, Cockpit-Instrumente und Operator Station

werden diese über Verstärker und Lautsprecher sowohl im Hubschrauber als auch um den Hubschrauber herum wiedergegeben. Darüber hinaus werden die niederfrequenten Anteile des Akustik-Signals an Shaker (Motoren mit Exzenter-Gewichten) übertragen, die mechanisch mit den Sitzen verbunden sind. Dadurch werden Vibrationen auf die Piloten übertragen, die Aspekte der Flugsimulation wie das Hochfahren der Triebwerke oder Interaktionen der Kufen mit dem Boden noch realitätsgetreuer erscheinen lassen.

#### 4. SICHTSYSTEM

Die Aufgabe des Sichtsystems ist, eine Visualisierungsumgebung bereitzustellen, die einen möglichst nahe am realen Fliegen liegenden visuellen Eindruck vermittelt. Da die menschliche Empfindung der räumlichen Lage maßgeblich durch das periphere Sichtfeld beeinflusst wird, muss die Visualisierung dieses periphere Sichtfeld adressieren. Hierzu ist eine Projektionsfläche nötig, die möglichst das gesamte Sichtfeld der Piloten abdeckt.

Diese Abdeckung des Sichtfeldes der Piloten kann durch eine gekrümmte Projektionsfläche um das Cockpit des Hubschraubers herum erreicht werden. Im Gegensatz zu Flächenflugzeugen, bei denen sich die Sicht auf nach vorne und seitlich beschränkt, ist beim Hubschrauber aufgrund des senkrechten Start- und Landevorgangs auch eine Sicht nach unten erforderlich. Damit ist neben der zylindrischen Krümmung in horizontaler (azimutaler) Richtung auch eine Krümmung in vertikaler Richtung (insb. nach unten) erforderlich, was zu der Forderung nach einer sphärisch gekrümmten Projektionsfläche führt. Mit einer sphärisch gekrümmten Projektionsfläche kann erreicht werden, dass die Piloten durch alle Fenster des Hubschraubers, inklusive der nach schräg-vorne-unten gerichteten Fenster, nur noch die simulierte Welt wahrnehmen können.

##### 4.1. Sichtfeldanalyse

Zur Formulierung der Anforderungen an das sphärisch gekrümmte Sichtsystem muss das Sichtfeld der Piloten genauer untersucht werden. Dazu wurde mithilfe eines 3D CAD Modells eine Projektion, ausgehend von den Augenpunkten der Piloten, durch die Cockpitfenster nach draußen simuliert.

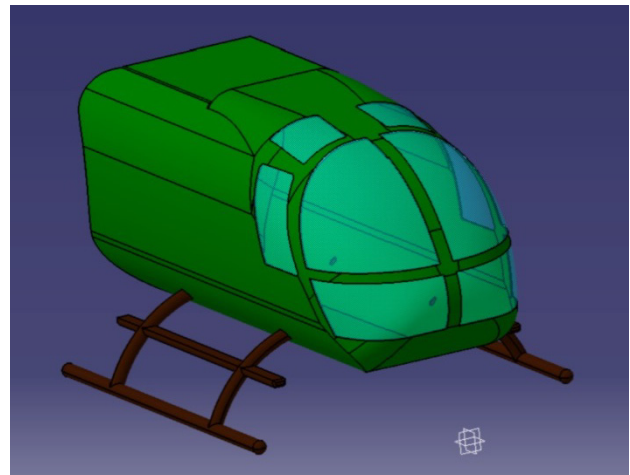


BILD 2. BO105 3D CAD Modell zur Projektion des Sichtfeldes von Pilot/Copilot [5]

Von der BO105 lag jedoch kein 3D CAD Modell vor, sodass auf Basis vorhandener 2D Ansichten des Hubschraubers von vorne, von oben und von der Seite ein 3D CAD Modell in Catia V5 [4] erstellt wurde. BILD 2 zeigt das CAD Modell, welches zur Projektion des Sichtfeldes von Pilot/Copilot erstellt wurde [5].

In diesem CAD Modell wurden im nächsten Schritt die Augenpositionen des Piloten/Copiloten abgeschätzt. Ausgehend von diesen Augenpositionen wurde dann eine Projektion durch die Cockpitfenster auf eine (zunächst fiktive) das Hubschrauber Cockpit umgebende sphärische Fläche projiziert. Dies entspricht der Situation einer Lampe im Inneren eines Raumes, deren Lichtschein durch ein Fenster nach draußen auf die Hauswand eines benachbarten Hauses fällt. Das Vorgehen wurde für alle Fenster und beide Piloten wiederholt. Die Schnittfläche zwischen der Projektion durch die Cockpitfenster und der sphärischen Fläche liefert diejenigen Ausschnitte der sphärischen Fläche, die von dem Piloten/Copiloten durch die Cockpitfenster sichtbar sind; diese sind in BILD 3 dargestellt.

Die Vermessung des Sichtfeldes von Pilot/Copilot ergibt eine horizontale Erstreckung von 240°, sowie einen unteren Radius der sphärischen Fläche von 1,5m, siehe BILD 4.

#### 4.2. Konstruktion Projektionsfläche

Bauliche Randbedingungen begrenzen die maximale Höhe der Projektionsfläche auf 2,5m sowie die maximale Breite auf 6,0m. Diese Begrenzungen sind in BILD 3 (obere Begrenzung) sowie BILD 4 (seitliche Begrenzung) ersichtlich. Insbesondere die obere Begrenzung schränkt das realisierbare Sichtfeld für den Piloten/Copiloten nach oben deutlich ein. Es wurde daher ein zweistufiges Vorgehen gewählt [5]:

- 1) Konstruktion der Projektionsfläche unter Einhaltung der zunächst bestehenden baulichen Randbedingungen, jedoch unter Wahrung einer zukünftigen Möglichkeit der
- 2) Erweiterung der Projektionsfläche ohne bauliche Begrenzung in der Höhe (finale Ausbaustufe)

Im Falle der zukünftigen Erweiterung der Projektionsfläche nach oben wäre der Hubschrauber nicht mehr auf dem Boden sondern in ca. 1m Höhe zu positionieren, was das Sichtfeld entsprechend nach oben verschieben würde. Dies erlaubt als weitere zukünftige Ausbaustufe darüber hinaus, den Hubschrauber auf eine Bewegungsplattform

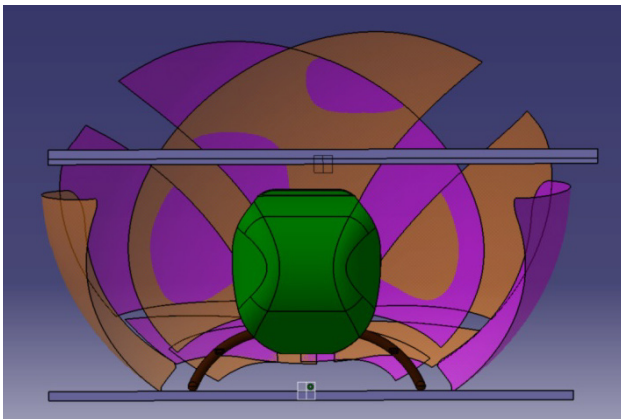


BILD 3. Sichtfeld Pilot/Copilot [5]

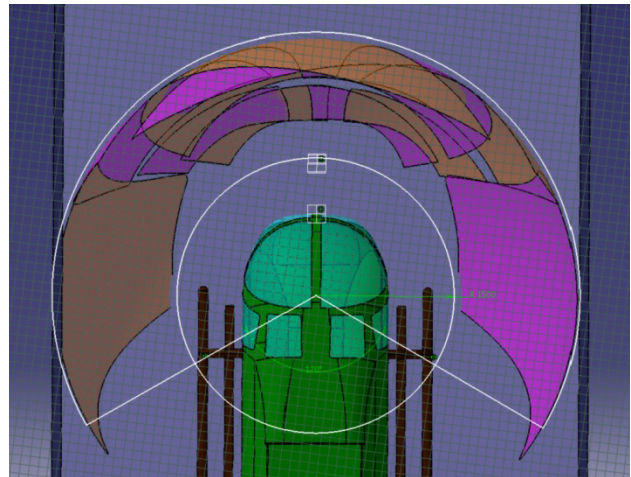


BILD 4. Vermessung Sichtfeld Pilot/Copilot [5]

zu positionieren (kinematische Hexapod Plattform), was die Umwandlung des zunächst als Fixed-Based konzipierten Flugsimulator in einen Full-Motion Flugsimulator erlauben würde.

Als Designentscheidung wurde für die sphärische Projektionsfläche ein Kugelradius von 2,3m festgelegt. Der Mittelpunkt der Kugel wurde in 2,3m Höhe, in der Symmetrieebene des Hubschraubers und in axialer Richtung auf Höhe der Augenpunkte des Piloten/Copiloten festgelegt, wie in BILD 4 ersichtlich. Weiterhin wurde sowohl aus produktionstechnischen Gründen sowie unter Betrachtung von Transport und Montage festgelegt, die sphärische Projektionsfläche mit den final angestrebten 240° in azimutaler Richtung in 8 x 30° aufzuteilen. Unter Ausnutzung der Symmetrie bei einem horizontalen Schnitt durch die Kugel (Äquator) entstehen insgesamt 16 identische Kugelsegmente, die unterhalb des Äquators (Südhalkugel) und oberhalb des Äquators (Nordhalkugel) zueinander gespiegelt montiert werden, wie in BILD 5 dargestellt.

Unter Berücksichtigung der baulichen Einschränkungen wurde in der ersten Ausbaustufe zunächst nur die Südhalkugel der Projektionsfläche aufgebaut, sowie in

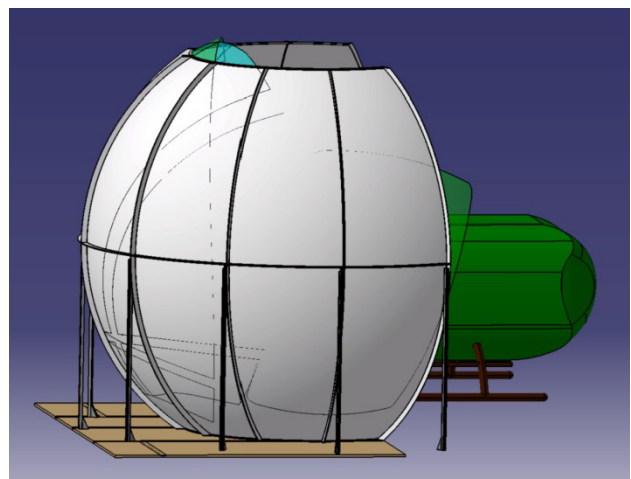


BILD 5. Geplanter finaler Aufbau der Projektionsfläche mit je acht Segmenten mit je 30° in azimutaler Richtung, symmetrisch oberhalb (Nordhalkugel) und unterhalb (Südhalkugel) des Äquators [5]

azimutaler Richtung mit sieben Segmenten ein Sichtfeld von 210° realisiert. Letztere Einschränkung ergab sich als geometrische Konsequenz aus der als Aufstellfläche für den Hubschrauber benötigten Breite und dem unteren Radius der Projektionsfläche.

### 4.3. Herstellung der Projektionsfläche

Die Herstellung der Segmente und des dazu notwendigen Werkzeuges wird im Folgenden lediglich kurz zusammengefasst [5]:

Die Segmente der Projektionsfläche wurden in Faserverbundtechnik hergestellt. Aufgrund der geringen Stückzahl von nur 16 Segmenten wurde ein manuelles Nass-Laminationsverfahren gewählt. Das benötigte formgebende Werkzeug wurde ebenfalls konstruiert und in diesem Verfahren hergestellt.

Für den Lagenaufbau der Segmente wurde eine Sandwichbauweise gewählt um eine hohe Steifigkeit in Biege- und Torsionsrichtung zu erzielen. Ein Kern aus Wabenvlies wurde symmetrisch mit mehreren hochfesten Lagen aus Glasfasergewebe und einer Gelcoat-Oberfläche kombiniert.

### 4.4. Ausleuchtungsanalyse

Ein charakteristischer Parameter für die Bildgeometrie eines Projektors ist das *Throw-Ratio*, ein Faktor, der das Verhältnis von Bildabstand und Bildbreite angibt. Aus Vorabschätzungen wurden für das Visualisierungssystem sechs Projektoren zur Ausleuchtung in zwei Zeilen mit je drei Projektoren festgelegt. Vorgaben des Herstellers Projection Design [6] für die verwendeten Projektoren des Typs F22 legen die maximale Neigung bei der Installation auf 20° fest. Somit scheidet eine direkte Projektion der unteren Zeile aufgrund eines sonst die Herstellervorgabe überschreitenden Installationswinkels aus und es wurde eine Projektion über einen Spiegel konstruiert.

Das CAD Modell der Projektionsfläche wurde im nächsten Schritt um einfache CAD Modelle der Projektoren ergänzt. Hierzu wurden mit dem bekannten Throw Ratio der Projektoren Pyramiden modelliert, deren Spitzen die Linsen der Projektoren als Lichtaustrittspunkt idealisieren und deren Ausrichtung der Projektionsrichtung entsprechen. Die Schnittfläche zwischen der Projektionsfläche und den Pyramiden liefert die

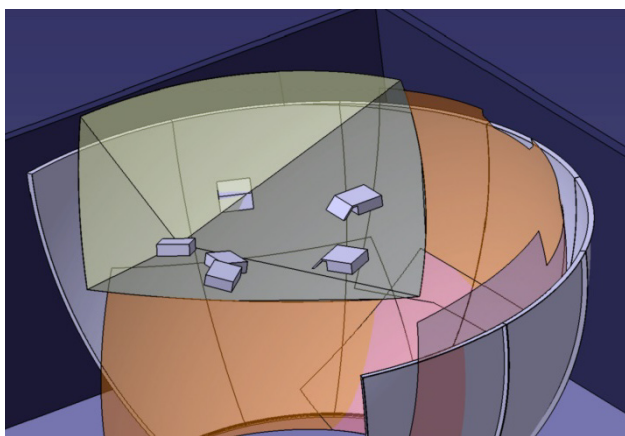


BILD 6. Modellierung der Projektion als Pyramide und Ermittlung der projizierten Bilder als Schnittfläche zwischen Pyramide und Projektionsfläche [5]

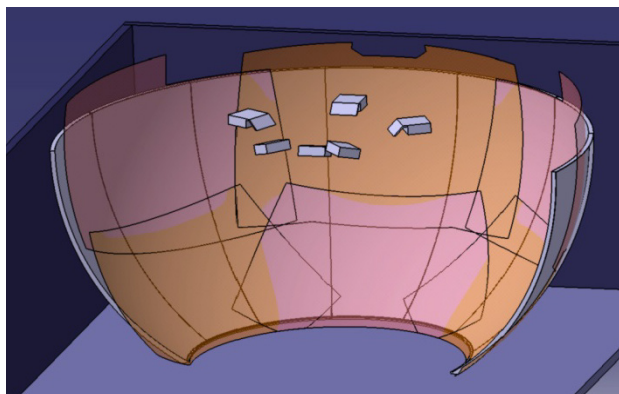


BILD 7. Ergebnis der Ausleuchtungsanalyse für die sphärische Projektionsfläche (Südhälfte mit sieben Segmenten) bei Verwendung von sechs Projektoren mit zweizeiliger Projektion [5]

projizierten Bilder der Projektoren auf der sphärischen Projektionsfläche, wie BILD 6 zeigt [5].

Mithilfe dieses Vorgehens konnte die Ausrichtung der sechs Projektoren ermittelt werden, wobei unter Anpassung des azimutalen Projektionswinkels sowie der Elevation der Projektionen eine Maximierung der insgesamt ausgeleuchteten Fläche einerseits sowie eine Beibehaltung des im nächsten Schritt des Warming/Blending benötigten Überlappungsbereichs andererseits optimiert wurde. Weiterhin mussten Abschattungen durch den Hubschrauber selbst sowie durch eventuell im Strahlengang weiter vorne befindliche Projektoren vermieden werden. Das Ergebnis ist in BILD 7 dargestellt und zeigt eine gute Ausleuchtung der gesamten Projektionsfläche trotz der baulichen Einschränkungen bezüglich der maximal verfügbaren Deckenhöhe.

### 4.5. Aufhängung der Projektoren

Zur Aufhängung der Projektoren wurde eine Konstruktion auf Basis von Item Profilen [7] erstellt, welche eine größtmögliche Flexibilität zur Positionierung und Ausrichtung der Projektoren bietet. BILD 8 zeigt die Konstruktion zur Aufhängung der Projektoren mit der Möglichkeit, alle Projektoren individuell translatorisch in x- und y-Richtung zu positionieren und über eine integrierte Halterung die jeweilige azimutale Richtung sowie Elevation und Drehung der Projektion einzustellen.

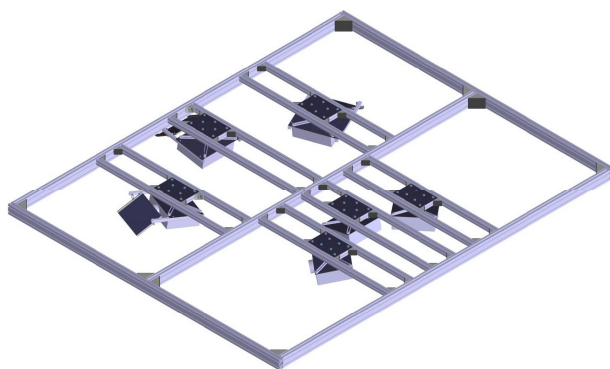


BILD 8. Konstruktion zur Aufhängung der Projektoren [5]

#### 4.6. Warping/Blending

Projektoren sind typischerweise für die Darstellung auf ebenen Projektionsflächen ausgelegt. Auf einer ebenen Projektionsfläche entsteht ein verzerrungsfreies Bild (alle Pixel erscheinen gleich groß), wenn die Projektion senkrecht auf die Projektionsfläche erfolgt. Wird das Bild unter einem Winkel schräg auf die Projektionsfläche geworfen, ergibt sich eine trapezförmige Verzerrung des Bildes, da die Länge des Strahlengangs und damit die Aufweitung der Strahlen unterschiedlich ist und sich so unterschiedliche große Pixel ergeben. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich bei der Projektion auf gekrümmte Projektionsflächen: Aufgrund der Krümmung der Projektionsfläche entstehen unterschiedliche Strahlengängen über das projizierte Bild und es entsteht eine gekrümmte Verzerrung.

Um dennoch ein unverzerrtes Bild auf einer gekrümmten Projektionsfläche zu erreichen, muss das Bild vor der Projektion unter Kenntnis der zu erwartenden geometrischen Verzerrung invers dazu vorverzerrt werden, sodass sich die Vorverzerrung und die geometrische Verzerrung durch die gekrümmte Leinwand gegenseitig aufheben. Diese Bildverarbeitung in Form einer Vorverzerrung ist unter dem Begriff *Warping* bekannt [9].

Ein zweiter zu berücksichtigender Effekt ergibt sich aus der Kombination einerseits der Krümmung und andererseits der Größe der Projektionsfläche: Mit zunehmender Größe der Projektionsfläche entsteht die Notwendigkeit, das Bild aus mehreren Projektoren zu erzeugen, wenn bei gegebener maximaler Auflösung eines Projektors die Größe der einzelnen Pixel ein für das Auge noch nicht wahrnehmbares Maß nicht überschreiten soll. Bei einer angenommenen ebenen Projektion wäre theoretisch durch ideale Positionierung der Projektoren eine perfekte Ausrichtung der benachbarten projizierten Bilder denkbar, die keinerlei Lücke und keinerlei Überlappung aufweisen.<sup>2</sup>

Bei einer sphärischen Projektionsfläche ist eine Ausrichtung der Ränder benachbarter Bilder aufgrund der unterschiedlich gekrümmten Verzerrung grundsätzlich nicht möglich. Um ein kontinuierliches Gesamtbild zu erreichen, bei dem die Übergänge zwischen den Einzelbildern nicht mehr wahrnehmbar sind, müssen sich die Bilder zwangsläufig an den Rändern überlappen. Die Voraussetzung für die Bildüberlappung ist, dass in benachbarten Bildern die Bildinformation des Überlappungsbereiches jeweils enthalten sein muss. Dem geht eine Reduktion der effektiven Auflösung des Gesamtbildes einher, welche proportional zum Verhältnis der überlappenden zu den nicht überlappenden Bildanteilen ist. Zur Vermeidung von erhöhter Helligkeit in den Überlappungsbereichen wird die Bildhelligkeit im Überlappungsbereich jeweils nach außen hin reduziert. Diese Bildverarbeitung in Form einer Helligkeitsanpassung im Überlappungsbereich ist unter dem Begriff *Edge-Blending* oder kurz *Blending* bekannt [9].

<sup>2</sup> In der Praxis führen bereits kleine Ungenauigkeiten in der Positionierung der Projektoren zu optischen Fehlern an der Übergangsgrenze zwischen zwei benachbarten Bildern. Bereits Fehler in der Größenordnung weniger Pixel führen zu negativ auffallenden schwarzen Streifen (unbeleuchtet) oder doppelt hellen Streifen (Überlappung), die vom menschlichen Auge als störend wahrgenommen werden.

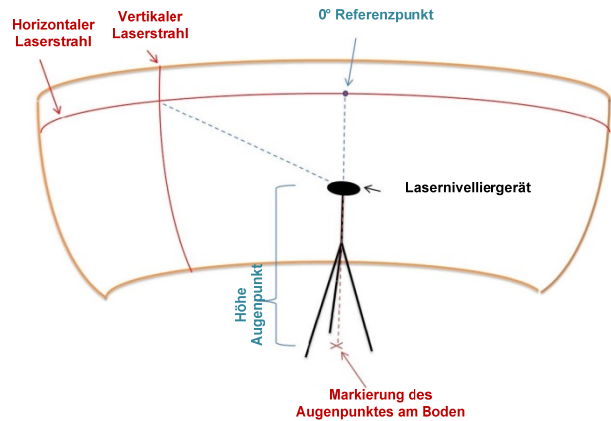


BILD 9. Bestimmung der Referenzpunkte in azimuthaler Richtung für den Auslegungs-Augenpunkt [9]

Warping und Blending lässt sich grundsätzlich auf drei unterschiedlichen Wegen erreichen: Es gibt vereinzelt Projektoren, die diese Funktionalität selbst beinhalten. Dies ist jedoch mit höheren Kosten sowie der Problematik verbunden, dass die Warping/Blending Geometrie an den Projektor übermittelt werden muss. Eine weitere Hardware Lösung ergibt sich durch dedizierte Hardware zwischen Computer und Projektor, welche das Warping/Blending übernimmt, jedoch sprechen auch hier die Kosten für zusätzliche Hardware sowie die Konfiguration der Warping/Blending Geometrie gegen diese Lösung. Favorisiert wurde Warping/Blending softwarebasiert in demselben Computer durchzuführen, der auch das zugehörige Bild generiert. Hierzu wurde die dedizierte Software Warpalizer des Herstellers Univisual Technologies [8] eingesetzt. Als besonders vorteilhaft hat sich erwiesen, dass die Warpalizer Software eine Server-Client Bedienung erlaubt, in der über ein Interface das Warping/Blending aller Clients gesteuert werden kann. So kann das Warping/Blending an einem Übergang zwischen zwei benachbarten Bildern eingestellt werden, ohne an zwei Computern parallel arbeiten zu müssen.

#### 4.7. Auslegung des Visualisierungssystems

Die praktische Auslegung des Visualisierungssystems erfordert die Bestimmung, welche Bildinformation zur Realisierung einer geometrisch korrekten sphärischen Projektion an welche Position der Projektionsfläche projiziert werden muss. Abhängig von der Augenposition des Betrachters im Raum verändert sich der Blickwinkel auf die gekrümmte Projektionsfläche. Es muss daher eine Position definiert werden, für welche die Visualisierung ausgelegt wird. Befindet sich ein Betrachter außerhalb des Auslegungspunktes, werden Verzerrungen im Bild wahrgenommen, beispielsweise erscheint der Horizont nicht mehr als gerade Linie. Als Kompromiss zwischen der Sicht für den Piloten/Copiloten wurde der geometrische Mittelpunkt zwischen den Augenpunkten von Pilot/Copilot gewählt, der entstehende geometrische Fehler durch die geringe Abweichung zwischen den tatsächlichen Augenpunkten von Pilot/Copilot und dem gewählten Auslegungspunkt hat sich als hinreichend klein herausgestellt, um nicht wahrgenommen zu werden.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Ein Beobachter, der sich seitlich neben dem Hubschrauber befindet, nimmt bereits eine merkliche Verzerrung der Gesamtprojektion wahr.

Neben dem Auslegungspunkt müssen Referenzpunkte auf der Projektionsfläche festgelegt werden. Hierzu wurden Punkte im Abstand von jeweils 10° in azimutaler Richtung sowie in jeweils 10° Elevation gewählt. Zur Bestimmung dieser Punkte wurde ein Lasernivelliergerät verwendet, welches im Auslegungspunkt positioniert wurde, wie in BILD 9 dargestellt.

Die Bestimmung der Referenzpunkte in Elevationsschritten von 10° kann mit Hilfe einer Schnur erfolgen, die in einem definierten Abstand vom Lasernivelliergerät von der Decke herabhängend befestigt wurde. Dazu wurden für den definierten Abstand im Voraus berechnete Markierungen an der Schnur angebracht, die den gewünschten Elevationsschritten entsprechen. Die Schatten der Markierungen auf der Projektionsfläche liefern die gewünschten Elevationen auf der Projektionsfläche, siehe BILD 10.

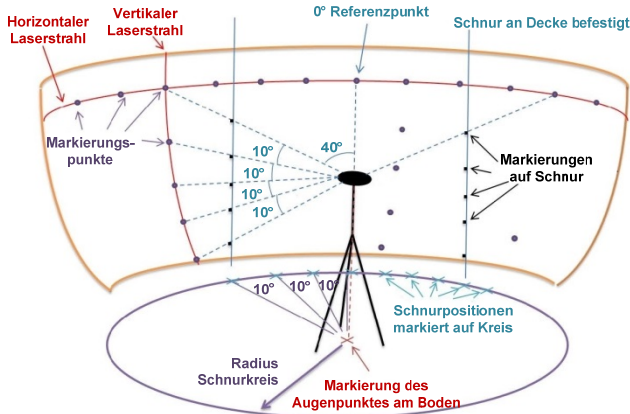


BILD 10. Bestimmung der Referenzpunkte unterschiedlicher Elevation für den Auslegungspunkt mit Hilfe von Markierungen auf einer herabhängenden Schnur [9]

Den letzten Schritt der Auslegung des Visualisierungssystems stellt die Konfiguration des *Field of View* der einzelnen Projektoren dar. Hierzu wird anhand der zuvor bestimmten Referenzmarkierungen für jedes Projektionsbild die maximale Ausdehnung in Azimut und Elevation bestimmt, wie in BILD 11 dargestellt. Aus diesen Werten lassen sich anschließend die benötigten Parameter für die Konfiguration des entsprechenden X-Plane Computers (Horizontal Field of View, Vertical Field of View, Horizontal Offset, Vertical Offset, ggf. Rotation) bestimmen [9].

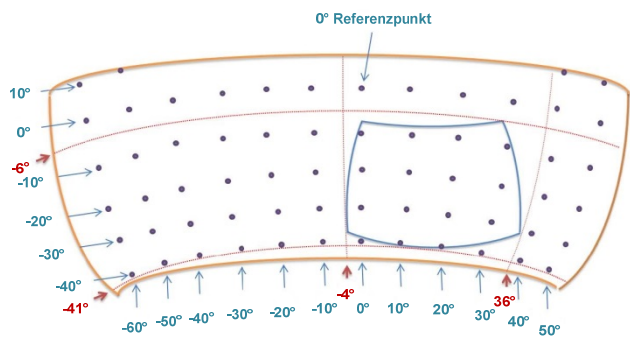


BILD 11. Ermittlung der Field of View Parameter der einzelnen Projektionen aus den zuvor festgelegten Referenzpunkten [9]

## 5. FLY-BY-WIRE KONVERTIERUNG

Unter dem Stichwort *Fly-by-Wire* Konvertierung wurden bei der Entwicklung des DHBW Flugsimulators alle Konvertierungen zusammengefasst, die der sensorischen Erfassung und Bereitstellung von Signalen für die Flugsimulation dienen. Darunter fällt die Digitalisierung mechanischer Messgrößen, konkret der Steuereingaben der Piloten, sowie die Anbindung von Schaltern im Cockpit, die bereits als diskrete Signale vorliegen. Für alle Signale müssen geeignete Interfaces geschaffen werden, um die Signale elektrisch an den Master Computer anzubinden sowie logisch in X-Plane verarbeiten zu können [10].

Die Bewegungen der primären Steuerhebel der Piloten, des Collective, des Cyclic Sticks und der Pedale werden im flugfähigen Hubschrauber über ein Gestänge mechanisch zur Rotorsteuereinheit geführt. Für den Simulator kommen weiterhin die Original-Steuerhebel zum Einsatz sowie ein Teil des mechanischen Gestänges, an welchem induktive Wegaufnehmer (LVDTs, Linear Variable Differential Transformers) als Sensoren zur Erfassung der Position integriert wurden. Ausschlaggebend für die Wahl von LVDT Sensoren war deren verschleißfreie Wandlung der Position in ein elektrisches Signal.

Zur Anbindung elektrischer Signale an die Flugsimulation kommen USB Human Interface Device (HID) Controller zum Einsatz. Diese Controller werden über USB mit dem Computer verbunden und dort als gewöhnlicher Gamecontroller über im Betriebssystem vorinstallierte Treiber erkannt. X-Plane erlaubt die Verwendung derartiger HID Controller und kann deren Inputs frei konfigurierbar Eingängen der Simulation zuordnen.

Die diskreten Signale in Form von Schaltern im Cockpit wurden über mehrere HID Controller an X-Plane angebunden und den jeweils entsprechenden Funktionen in der Simulation zugeordnet. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit der A/D Wandler der HID Controller wurde für die analogen Eingänge der LVDT Sensoren ein Feldbussystem mit 16-bit A/D Wandler und Ethernet Anschluss ausgewählt. Im Gegensatz zur direkten Erkennung der HID Controller ist für das Feldbussystem keine direkte Weiterverarbeitung in X-Plane möglich. X-Plane bietet jedoch die Möglichkeit, über UDP Daten zu empfangen, welche wiederum die Versorgung interner X-Plane Variablen mit externen Daten erlaubt. Hierzu wurde eine Software entwickelt, welche einerseits mit dem

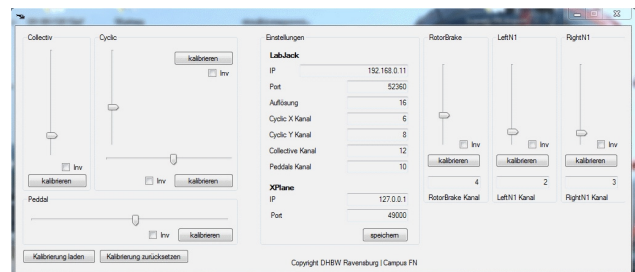


BILD 12. Software zur Kommunikation mit dem Feldbussystem zur Erfassung der analogen Eingänge der Pilotensteuerhebel Collective, Cyclic, Pedale (links) sowie der Rotorbremse und der Triebwerkshebel (rechts) und deren parametrisierbare Weitergabe an X-Plane (Mitte)



BILD 13. Original BO105 Instrumente, Zustand vor der Glass-Cockpit Konvertierung

Feldbussystem und andererseits mit X-Plane kommuniziert und so die Datenweitergabe realisiert [10], [11]. BILD 12 zeigt die Oberfläche der entwickelten Software mit grafischer Repräsentation der analogen Werte, entsprechend der aktuell erfassten Positionen der Pilotensteuerhebel.

Im Zuge der Fly-by-Wire Konvertierung wurde die ursprüngliche Hubschrauber-Verkabelung weitgehend ersetzt, so dass jetzt alle Schalter im Cockpit inklusive der Piloten-Steuerhebel und des Overhead-Panels in der Simulation zur Verfügung stehen.

## 6. GLASS-COCKPIT KONVERTIERUNG

Für den Flugsimulator wurde die Weiterverwendung der Original Instrumente nicht in Betracht gezogen, da diese als klassische Rundinstrumente teilweise mechanisch



BILD 14. Konzept der Glass Cockpit Konvertierung mit Warnings und Cautions Anzeigen, Primary Flight Display (PFD), Multi Function Display (MFD), Engine Indication and Crew Alerting Display (EICAS), umschaltbarer Flight Map oder Google Maps, sowie Touch-fähigem Display (Human Machine Interface, HMI) im Center Pedestal [12]

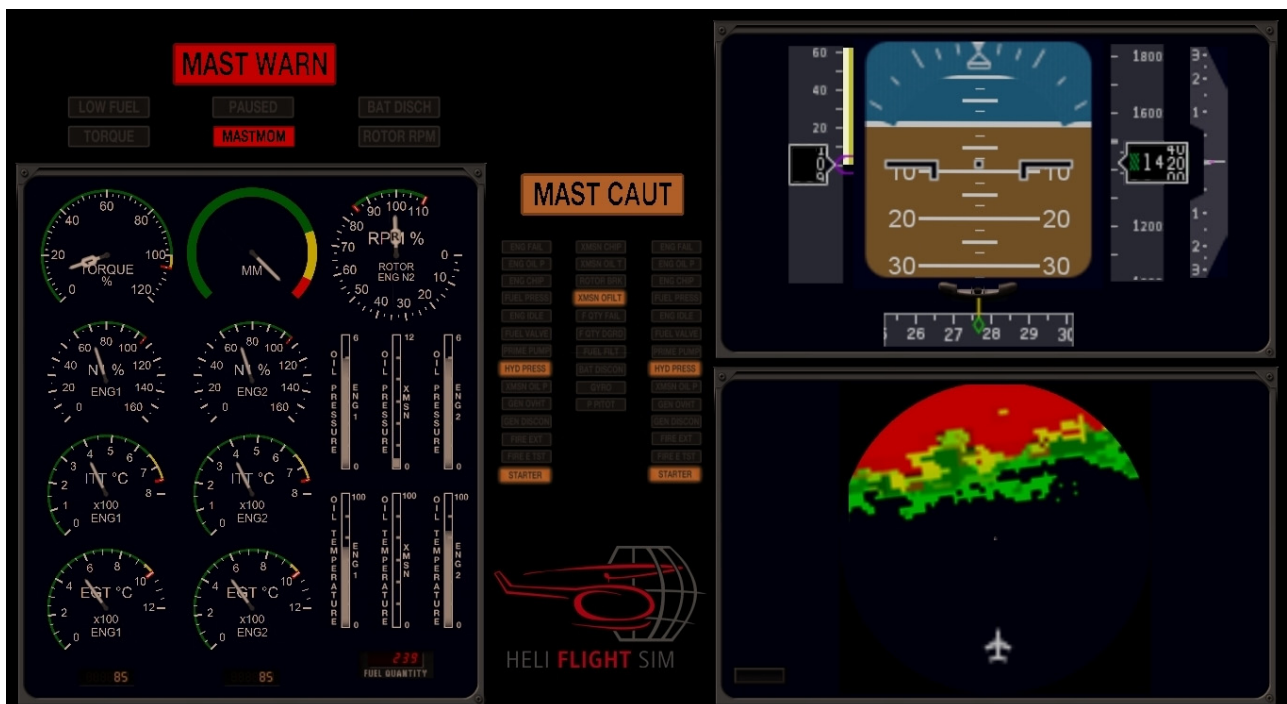


BILD 15. Instrumenten Display, Zustand nach der Glass-Cockpit Konvertierung



oder pneumatisch angesteuert werden (mechanische oder pneumatische Quellen wären im Simulator-Betrieb nicht verfügbar) und weil Displays eine größere Flexibilität bieten. Daher wurden die Original Instrumente ersetzt durch zwei Bildschirme, deren Größe passend zur Cockpit Geometrie ausgewählt wurde. BILD 13 zeigt den Zustand vor der Glass-Cockpit Konvertierung.

In BILD 14 ist das Konzept für die Glass-Cockpit Konvertierung dargestellt. Im oberen Display wurden Original Anzeigen der BO105 integriert, arrangiert als Primary Flight Display (PFD), Engine Indication and Crew Alerting Display (EICAS), sowie Bereichen für die Warnings und Cautions Anzeigen. Ergänzt wurde ein Multi Function Display (MFD) sowie im unteren Display eine Kartendarstellung, bei der wahlweise eine Flugkarte oder eine Google Maps [13] Darstellung gewählt werden kann. Im Center Pedestal wurde darüber hinaus ein Touch-fähiges Display integriert als zusätzliches, flexibel einsetzbares Human Machine Interface (HMI).

BILD 15 zeigt das Instrumenten Display als Ergebnis der Glass-Cockpit Konvertierung. Das Design und Layout der digitalen Instrumente wurde an das moderner Glass-Cockpit Hubschrauber angelehnt und in Zusammenarbeit mit Piloten entwickelt. Die Umsetzung erfolgte in X-Plane Plane Maker und das (obere) Instrumenten Display wird von X-Plane angesteuert. Damit wurde eine vollständige Adaptierbarkeit für zukünftig geänderte Anforderungen sichergestellt [12].

## 7. EVALUATION DES SIMULATORS

Zur Evaluation der Güte des Flugsimulators wurden Flugmanöver ausgewählt, anhand derer Hubschrauber-Piloten die Sensitivität der Steuereingaben und das simulierte Flugverhalten bewerten konnten. Die folgenden Manöver wurden durchgeführt:

- *Light on skids*<sup>4</sup>
- Schweben im Bodeneffekt
- Drehung um die Hochachse im Bodeneffekt
- Vorwärts- und Rückwärtsflug im Bodeneffekt
- Abflug über die Startbahn
- Quickstopp

Insgesamt waren die Piloten positiv überrascht, wie realistisch sich der Simulator fliegt und wie „direkt man sich vom Gefühl her im echten Fluggerät wiederfindet“ [14].

Im Vergleich mit dem realen Flugverhalten des Hubschraubers wurden in der Simulation leichte Unterschiede festgestellt, wie eine etwas zu gutmütige und etwas zu stabile Reaktion in der Simulation und eine minimal zu langsame Cockpit-Anzeige des Rotor-Torque. Die Drehrate und Empfindlichkeit auf Pedaleingaben wurde als realitätsgetreu bewertet, ebenso die durch Geschwindigkeitsaufbau veränderten Steuereigenschaften sowie das Startverhalten mit Geschwindigkeitsaufbau, Übergang aus dem Bodeneffekt und Steigen. Allgemein wurden die Steuereingaben über Collective und Stick als gut und realistisch bewertet. Sehr gut war der Effekt des Verlassens und Eintretens in den Bodeneffekt [14].

<sup>4</sup> Um diesen Flugzustand zu erreichen, zieht der Pilot am Collective, bis ein Teil der Gewichtskraft, die auf den Hubschrauber wirkt, von der erzeugten Auftriebskraft des Hauptrotors aufgehoben wird. Der Helikopter verliert folglich an „festem Stand“ auf dem Boden und in der Realität kann der Helikopter anfangen zu rutschen oder zu kippen [14].

## 8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Auf Basis eines MBB BO105 Hubschraubers wurde ein Flugsimulator entwickelt und aufgebaut. Zur Konvertierung wurden nicht benötigte Komponenten, insbesondere der Rotor, die Triebwerke und das Hauptgetriebe sowie der Heckausleger entfernt. Die Zelle inklusive der Sitze, das Cockpit und die Steuerhebel wurden im Original beibehalten.

Großer Wert wurde auf die Entwicklung des Sichtsystems gelegt. Hierzu wurde zunächst mit Hilfe von eigens erstellten CAD Modellen eine Sichtfeldanalyse für Pilot und Copilot durchgeführt und eine sphärisch gekrümmte Projektionsfläche konstruiert und gebaut, deren Projektion mit Hilfe von sechs Projektoren erfolgt.

Die Projektionsfläche wurde in einer ersten Ausbaustufe (siehe BILD 16) mit einer Rundumsicht von 210° realisiert. In der Endausbaustufe kann die Projektionsfläche in der Höhe verdoppelt und die Rundumsicht auf 240° vergrößert werden.

Aktuell handelt es sich um einen Fixed-Based Simulator. Zukünftig ist jedoch eine Erweiterung zu einem Full-Motion Simulator möglich. Hierzu muss der Hubschrauber auf einer Bewegungsplattform installiert werden und deren Ansteuerung auf Basis von X-Plane Simulationsdaten erfolgen.

Die Instrumente wurden durch Darstellungen der jeweiligen Funktionen auf Displays ersetzt, welche in Anlehnung an moderne Glass-Cockpits entworfen wurden. Die Instrumentendarstellung wurde wie die Flugsimulation selbst basierend auf X-Plane realisiert, was für zukünftige Nutzungen vollständige Freiheit bietet, Anpassungen für unterschiedliche Einsatzzwecke vorzunehmen. Gleichmaßen besteht die Flexibilität, unterschiedliche flugmechanische Modelle, auch anderer Hubschrauber-Typen, für unterschiedliche Verwendungen des Simulators einzusetzen.

Zusammenfassend wurde in der Pilotenevaluation des Simulators festgestellt, dass die Flugeigenschaften der BO105 im Simulator der Realität sehr ähnlich sind. Die Reaktionen des Hubschraubers auf bestimmte Steuereingaben im jeweiligen Flugmanöver waren so, wie es bei einem echten Helikopter zu erwarten wäre. Die Unterschiede zur Realität erschienen klein gegenüber den sehr realistischen Effekten und des durchaus realen Flugverhaltens.

Damit steht mit dem DHBW Hubschrauber Flugsimulator eine qualitativ hochwertige und anpassbare Entwicklungsplattform zur Nutzung sowohl in der Forschung als auch in der Lehre zur Verfügung. Geplante Einsatzbereiche umfassen Simulationen und Untersuchungen im Bereich Flugsimulation, Flugregelung, Missionssimulation sowie Entwicklungen im Bereich Cockpit- und Mensch-Maschine-Schnittstelle.



BILD 16. Hubschrauber Flugsimulator mit Projektionsfläche (erste Ausbaustufe) und Operator Station

## 9. LITERATUR

- [1] Besser, R., Technik und Geschichte der Hubschrauber, Bernard & Graefe Verlag, 1996
- [2] Allerton, D., Principles of Flight Simulation, Wiley, 2009
- [3] Laminar Research X-Plane, [www.x-plane.com/press-kit/](http://www.x-plane.com/press-kit/), 2018, Einsichtnahme 23.06.2018
- [4] Dassault Systemes, Catia V5, [www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/v5/portfolio/](http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/v5/portfolio/), 2002-2018, Einsichtnahme 24.06.2018
- [5] Notz, R., Weckerle, K., Helikopter-Flug-Simulation Visualisierung - Hardware, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2013
- [6] Projection Design F22 series, Technical specification, Projection Design, 2012
- [7] item Produktwelt, item Industrietechnik, [www.item24.de/produktwelt.html](http://www.item24.de/produktwelt.html), 2018, Einsichtnahme 24.06.2018
- [8] Univisual Technologies Warpalizer, [www.item24.de/produktwelt.html](http://www.item24.de/produktwelt.html), 2018, Einsichtnahme 24.06.2018
- [9] Heinz, Y., Thum, B., Waring und Blending am Hubschrauber Flugsimulator der DHBW Ravensburg, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2013
- [10] Niedhart, P., Diesch, F., Müller, S., Bischofberger, S., Fly-By-Wire Konvertierung, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2013
- [11] Hantz, C., Operator Station, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2015
- [12] Randi, F., Förg, S., Heli Flight Sim – Instrumente/Glass Cockpit, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2014
- [13] Google Earth, Google, [www.google.com/intl/de/earth/desktop/](http://www.google.com/intl/de/earth/desktop/), 2018, Einsichtnahme 29.06.2018
- [14] Schier, A., Kranich, F., Heli Flight Sim – Simulator Control Sensitivities, Studienarbeit, DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen, 2016

### Kontaktadresse:

[mannchen@dhbw-ravensburg.de](mailto:mannchen@dhbw-ravensburg.de)