UNIVERSITY OF STUTTGART
INSTITUTE OF SPACE SYSTEMS
Space Center Baden-Wuerttemberg (RZBW)

Pfaffenwaldring 29 · 70569 Stuttgart GERMANY· Tel.: +49 711 685-69604 · Fax: +49 711 685-63596 · www.irs.uni-stuttgart.de

Abschlussbericht

Zum Projekt
50WB2036

gefördert durch die DLR-Raumfahrtagentur

mit dem Titel

SIMSKILL-VR „Nutzung eines Virtual-Reality Raumflugsimulators für die Untersuchung der Astronauten-Pilotierfähigkeiten in der SIRIUS Isolationsstudie“

im Zeitraum

01.06.2020 – 31.08.2023

Prof. Gisela Detrell
Dr. Santiago Lopez
Dipl.-Ing. Miquel Bosch Brugera

IRS-24-eIB-004

Februar 2024

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr.-Ing. Sabine Klinkner (Deputy Director) · Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · Prof. Dr. rer. nat. Reinhold Ewald · Apl Prof. Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig · Hon.-Prof. Dr. rer.nat. Christoph Nöldeke · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · Apl. Prof. Dr.-Ing. Ralf Srama

Team

Department:	**Astronautics and Space Stations** **Institute of Space Systems** **University of Stuttgart** **Pfaffenwaldring 29 – 70569 Stuttgart**
Principal Investigator (PI)	**Prof. Dr. Reinhold Ewald** *ewald@irs.uni-stuttgart.de* Tel.: +49 711 685 62504
Co- PI	**Prof. Dr.-Ing. Gisela Detrell** gisela.detrell@tum.de Tel.: +49 1520 9705509
Project Coordinator	**Dipl.-Ing. Miquel Bosch Brugera** bosch@irs.uni-stuttgart.de +49 15205745810
Project Scientist	**Dr.-Ing. Santiago López** lopezbermudezj@irs.uni-stuttgart.de Tel.: +49 711 685 69610

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Antarktis-Forschungsstationen Concordia (Frankreich, Italien) und Halley VI (Vereinigtes Königreich). Bild-credits: Miquel Bosch Bruguera (links); British Antarctic Survey (rechts). 10
Abbildung 2: Zusammenbau des Federatsiya-Simulators in der NEK-Anlage während der Durchführung von BDC-Tests nach der Isolationskampagne (Juli 2019, SIRIUS 19). Bildcredits: Miquel Bosch Bruguera 11
Abbildung 3: Links - Docking-Cockpit-Display innerhalb der VR-Umgebung. Richtig - VR Setup mit Echtzeit-Handerkennung..... 11
Abbildung 4: Simplified workflow of the spacecraft docking simulator developed at the IRS. 12
Abbildung 5: Außenansicht der Simulation mit dem PTK-Federatsiya Andocken an das LOP-G in verschiedenen Orbitalen Szenarien. 12
Abbildung 6: Detaillierter Verlauf des Experiments (große Ansicht in Abbildung 12) 13
Abbildung 7: SIMSKILL-VR Experten am Training der SIRIUS-21 Besatzung am IMBP. 15
Abbildung 8: Trainingsprotokoll der SIRIUS-21 Besatzung. Jeder Teilnehmer hat 10 Trainingsstunden abgeschlossen, bevor es zum Baseline Data Collection Testflug geht (ICF). 15
Abbildung 9: Trainingsmaterialien zur Unterstützung der Crew (Flug Logbuch sowie physisches Miniatur-modell der Raumschiffe)..... 16
Abbildung 10: Teilnehmer am Training (oben). SIRIUS-21 Prime Crew zusammen mit IRS Team. 16
Abbildung 11: Eye-Tracking Heat Maps zur Untersuchung der Konzentration des Piloten auf die virtuelle Cockpit-Panelle während eines Fluges 20
Abbildung 12: Detaillierter Projektverlauf des SIMSKILL-VR Experiments 25

Kurzfassung

Das Projekt SIMSKILL-VR "Nutzung eines Virtual-Reality Raumflugsimulators für die Untersuchung der Astronauten-Pilotierfähigkeiten in der SIRIUS Isolationsstudie" (Zuwendung 50WB2036) wurde von Juni 2020 bis August 2023 durchgeführt. Das Hauptziel des Projekts war es, zu verstehen, wie sich die menschliche Pilotenleistung unter Langzeitisolation und -einschluss entwickelt, und Lösungen für die Verbesserung der menschlichen Sicherheit und die Optimierung des Astronauten-Pilotentrainings für künftige Langzeit-Weltraummissionen zu finden.

Das Projekt baute auf den vorangegangenen Projekten SIMSKILL-Antarktis und SIMSKILL-RU auf, die als Grundlage für die Entwicklung eines virtuellen Realitäts-Docking-Simulators dienten, der für zwei lange Isolationsstudien in der SIRIUS-Anlage (SIRIUS-21 und SIRISU-23) entwickelt wurde.

Die Hard- und Software wurde für den Einsatz in SIRIUS-21 vorbereitet und versandt, das ein Jahr später als ursprünglich geplant begann. Ein IRS-Team war vor Beginn des Isolationsexperiments anwesend, um die Besatzung zu schulen. Das Isolationsexperiment begann im Juni 2021 und dauerte 8 Monate. Eine wichtige Änderung war die Verringerung der Besatzung von 6 auf 5 Mitglieder aufgrund einer Verletzung. Während dieses Experiments beeinflusste ein äußerer Faktor die Fortsetzung des SIMSKILL-VR-Projekts: der Krieg zwischen der Ukraine und Russland. Das Isolationsexperiment wurde fortgesetzt, aber die neue Situation brachte es mit sich, dass die Daten nicht sofort nach dem Experiment zur Verfügung gestellt wurden, die Teilnahme an weiteren Experimenten abgesagt wurde und die Hardware nicht wie geplant zurückgegeben werden konnte.

Die Daten wurden von der ESA erst Ende 2023 geliefert und sind daher noch nicht vollständig ausgewertet. Das an diesem Projekt beteiligte Team wird nach diesem Datum weiterarbeiten und die Daten veröffentlichen (derzeit ist eine Veröffentlichung auf der Internationalen Astronautischen Konferenz und/oder in der Zeitschrift Acta Astronautica geplant).

Die Dokumentation der Entwicklung des Projekts, seiner Hard- und Software ist verfügbar, und während des Projekts sind mehrere Veröffentlichungen erfolgt. Obwohl derzeit kein direktes Folgeprojekt geplant ist, ist das Team, das hinter dem Projekt steht (obwohl es nicht mehr am IRS arbeitet), an der Forschung und einer möglichen Fortsetzung in der Zukunft interessiert.

Contents

Abbildungsverzeichnis ... 3
Kurzfassung ... 4
Abkürzungen ... 6
I. Kurze Darstellung ... 7
I.1 Aufgabenstellung ... 7
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 9
I.2.1 Vorarbeiten ... 9
I.2.2 Weitere Voraussetzungen ... 13
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 13
I.3.1 Vorarbeiten ... 13
I.3.2 Transport, Aufbau und Test ... 14
I.3.3 Crew Training von SIRIUS-21 ... 14
I.3.4 SIRIUS-21 Experiment ... 16
I.3.5 Datenauswertung und Veröffentlichung ... 17
I.3.6 Post SIRIUS-21 Experiment und SIRIUS-23 ... 17
I.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand ... 17
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 18
II. Durchführung des Vorhabens ... 19
II.1 Erzielte Ergebnisse ... 19
II.1.1 Eye-Tracking ... 20
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 20
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 21
II.4 Voraussichtlicher Nutzen ... 21
II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderer Stelle ... 21
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses ... 22
III. Referenzen ... 23
IV. Anlagen ... 25

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
IBMP	Instituts für Biomedizinische Probleme
IRS	Institut für Raumfahrsysteme
VR	Virtual Reallity

I. Kurze Darstellung

I.1 *Aufgabenstellung*

Das Studium und die Bewertung der Astronautenfähigkeiten ist seit Beginn der astronautischen Raumfahrt eine zentrale Forschungsfrage. Die Suche nach einer optimalen Trainingsmethode und das Ziel, die menschliche Leistung zu maximieren, sind seither zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor für eine astronautische Raumfahrtmission geworden.

Angesichts der Natur des Menschen, der einer Vielzahl von internen und externen Faktoren ausgesetzt ist, wurde von der wissenschaftlichen Gemeinschaft ein gründlicher Versuch unternommen, die Leistung zu parametrisieren, indem Normen und Testlayouts definiert wurden, die die Ausgabe komplexer Aufgaben auf eine Reihe von vereinfachten Parametern reduzieren würden. Bei der Pilotenbewertung geht die Definition von Routinen und Testaufbauten für die Ausbildung und Qualifikationsbewertung auf die ersten Jahre der Luftfahrt zurück, meist im militärischen Bereich [1].

Auch im Raumfahrtsektor ist dieses Thema seit den ersten Flügen von größter Bedeutung. Es wurden neue Techniken für die Pilotenausbildung entwickelt und völlig neue Ansätze für die Ausbildung der Besatzung entwickelt. Geringere Flugmöglichkeiten und die unerschwinglichen Kosten für den Start zu vieler Testmissionen brachten ein neues Konzept für die Pilotenausbildung ins Spiel: den Einsatz von Raumfahrtsimulatoren. Während sich das elektronische und digitale Zeitalter in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts etablierte, wurden Pilotsimulatoren auch zu einem wichtigen Bestandteil der Crew-Ausbildung. Trotz der Zunahme der Rechenleistung konnten sich Simulationsanlagen jedoch noch keine völlig autonome, computergestützte Simulation leisten. Frühe Weltraumprogramme wie Mercury präsentierten die ersten Simulationskonzepte [2]. Viele Systeme und Subsysteme mussten als echte Flughardware an den Hauptrechner angeschlossen werden: die sogenannte Hardware-in-the-Loop-Lösung. Diese Methode erlaubte und erlaubt es, reale Fluggeräte am Boden zu testen und ihr Verhalten vor dem Flug zu zertifizieren und zu validieren, erfordert aber ein komplexes und teures Setup. Die Ausbildung von Astronauten an echter Flughardware oder zumindest in sehr realistischen Modellen hat daher bisher einen Nachteil: ihre Kosten und Abmessungen. Wie in allen aktuellen Weltraumprogrammen zu sehen ist, erfordern realistische Simulationsaufbauten den Einsatz von realen Modellen, riesigen Einrichtungen und Konzepten mit hohem Budget. Das NASA Space-Shuttle-Programm umfasste viele hochmoderne Astronautentrainingseinrichtungen, darunter Ansätze wie die Vertical Motion Simulators (VMS) zur Verbesserung des Realismus [3]. Auf russischer Seite hat sich das Sojus-Programm im Laufe der Jahre weiterentwickelt und bietet heute maßstabsgetreue Kapseln und echte Flughardware, die in einem breiten

Anwendungsspektrum eingesetzt wird, vom Zentrifugentraining bis hin zu Rendezvous- und Andockverfahren [4].

In den letzten Jahren ist die Rechenleistung von Personalcomputern jedoch so gestiegen, dass die Simulation realistischer Echtzeitumgebungen mit Virtual Reality mit erschwinglichen Computeraufbauten möglich ist. Die Leistungssteigerung bei Grafikprozessoren (GPUs oder Grafikkarten) und Zentraleinheiten (CPUs oder Prozessoren) ermöglicht die Darstellung stereoskopischer Umgebungen mit hoher Framerate, so dass die menschliche Wahrnehmung so flüssig ist wie die der realen Welt. Daher werden Virtual-Reality-Konzepte in vielen Bereichen der Personalschulung und -bewertung sowie unter anderem in der Unterhaltungs- und Filmindustrie breit eingesetzt. Darüber hinaus erhöht diese Technologie nicht nur den Realismus, sondern ermöglicht es auch Wissenschaftlern, sie als psychologische und berufliche Behandlung wie Akrophobie, chronisches Nachkriegstrauma, unter anderem, einzusetzen [5, 6, 7, 8].

Die Vielseitigkeit dieses Konzepts und seine optimale Anwendbarkeit in abgelegenen und isolierten Umgebungen führten zur Entwicklung eines VR-Raumfahrtsimulators zur Untersuchung der Pilotierungsleistung von Menschen, die ähnlichen Bedingungen ausgesetzt sind wie im Weltraum in den sogenannten analogen Missionen.

Das Hauptziel dieses Forschungsprojektes war es, zu verstehen, wie sich die Leistung der menschlichen Piloten unter langfristiger Isolation und Einschränkung entwickelt, und Lösungen für die Verbesserung der menschlichen Sicherheit anzubieten sowie die Ausbildung der Astronautenpiloten für zukünftige Langzeit-Weltraummissionen zu optimieren.

Mit der Verwendung eines kompletten Virtual Reality-Setups, das auf einer hochpräzisen Cockpitumgebung für Raumfahrzeuge (PTK-Federatsiya) basiert, und der Verwendung modernster Technologien wie Eyetracking und Handtracking wurde die Leistung des Piloten analysiert, indem die protokollierten Daten sowohl aus dem Missionsstatus als auch aus den Human-Computer-Schnittstellen kombiniert wurden. Verschiedene Flugszenarien, die auf dem Anflug der neuen russischen PTK-Federatsiya/Orel auf das Lunar Orbital Platform-Gateway basieren, wurden durchgeführt und aufgezeichnet.

I.2 *Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde*

Das Projekt SIMSKILL-VR baute auf den Erkenntnissen und Team der Vorgängerprojekte in der Antarktis (SIMSKILL) und in Russland (SIMSKILL-RU) auf und stellte sowohl in technischer als auch in experimenteller Hinsicht eine Verbesserung dar. Die Erfahrungen, die während der vorherigen Experimente gesammelt wurden, ermöglichten eine optimierte Definition des Protokolls, die Erstellung von Flugszenarien und Methoden zur Datenanalyse. Die Entwicklung des Flugsimulators, seine Anpassung an VR und seine Verschiffung nach Russland wurden gründlich im Voraus geplant, um von der Besatzung gebaut und betrieben zu werden.

I.2.1 *Vorarbeiten*

I.2.1.1 *SIMSKILL-Antarktis*

Der Einsatz des Soyuz-Simulators vom Institut für Raumfahrtsysteme in der Forschung hat erst mit dem SIMSKILL-Experiment stattgefunden (Vorhabennummer. 50WB1531). Die gewonnene Erfahrung im Bereich Simulatoren und Performance-Auswertung hat es ermöglicht, eine Reihe von Experimenten durchzuführen, die den Ursprung des aktuellen Vorhabens setzen.

Das SIMSKILL-Projekt legt die Grundlagen für die vorgeschlagene Forschungsstudie. Dieses Experiment wurde im Rahmen der Wissenschaftsmöglichkeiten der ESA in der Antarktis (Concordia und Halley VI, siehe Abbildung 1) durchgeführt und ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart (Deutschland), der Royal Military Academy (Brüssel, Belgien) und der Psychologischen Fakultät der Sapienza (Rom, Italien). Der Projektzeitraum erstreckte sich von 2015 bis 2019, mit insgesamt zwei abgeschlossenen Winterkampagnen in jeder der Forschungsstationen und einer Kontrollstudie in Stuttgart. Ergebnisse dieses Projekts können bei Bosch Bruguera et al. [9] [10] [11] sowie im Abschlussbericht des Vorhabens [12] im Detail gesehen werden.

Abbildung 1: Antarktis-Forschungsstationen Concordia (Frankreich, Italien) und Halley VI (Vereinigtes Königreich). Bild-credits: Miquel Bosch Bruguera (links); British Antarctic Survey (rechts).

I.2.1.2 *SIMSKILL-RU*

Ein Folgeprojekt von SIMSKILL, bekannt als SIMSKILL-RU, begann Mitte 2018 in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und den russischen Partnern des Instituts für Biomedizinische Probleme (IMBP). Ziel war es, das bereits gesammelte Wissen von SIMSKILL in einer neuen Umgebung anzuwenden: der analogen Mission SIRIUS. SIMSKILL-RU bot die Gelegenheit, reale Astronauten und Luft- und Raumfahrtexperten in einem vollständig überwachten, raumfahrzeugähnlichen Setup zu testen, das eine Mondmission simulieren sollte. Die Implementierung des Projekts erfolgte nach strengen Protokollen und Vorbereitungen, um die Qualität der wissenschaftlichen Ergebnisse sicherzustellen. Die Hardware-Implementierung umfasste die Umrüstung des Sojus-Simulators für das zukünftige Raumfahrzeug der russischen Föderation. SIMSKILL-RU hat einen Einblick geliefert, wie sich Fähigkeiten langfristig in einer engen Umgebung entwickeln, und ergänzte die Ergebnisse des vorläufigen Experiments SIMSKILL.

Abbildung 2: Zusammenbau des Federatsiya-Simulators in der NEK-Anlage während der Durchführung von BDC-Tests nach der Isolationskampagne (Juli 2019, SIRIUS 19). Bildcredits: Miquel Bosch Bruguera

I.2.1.3 *Virtual Reality Docking Simulator*

Die Aufrüstung zu einem Virtual-Reality-Setup war bereits unabhängig von seiner möglichen Implementierung beim SIRIUS-21-Experiment geplant. Die Arbeiten, die am IRS durchgeführt wurden, bedeuteten eine wesentliche Änderung als Simulator-Konzept. Die Kombination aus physischer Hardware und einem virtuellen Cockpit wurde als immersive Umgebung vorgeschlagen, die sowohl den Realismus durch bessere Grafik und peripheren Blick verbessern als auch eine optimale Steuerung des Raumschiffs mit einer Mischung aus herkömmlichen Joysticks und Hand-Tracking-Geräten ermöglichen würde.

Abbildung 3: Links - Docking-Cockpit-Display innerhalb der VR-Umgebung. Richtig - VR Setup mit Echtzeit-Handerkennung.

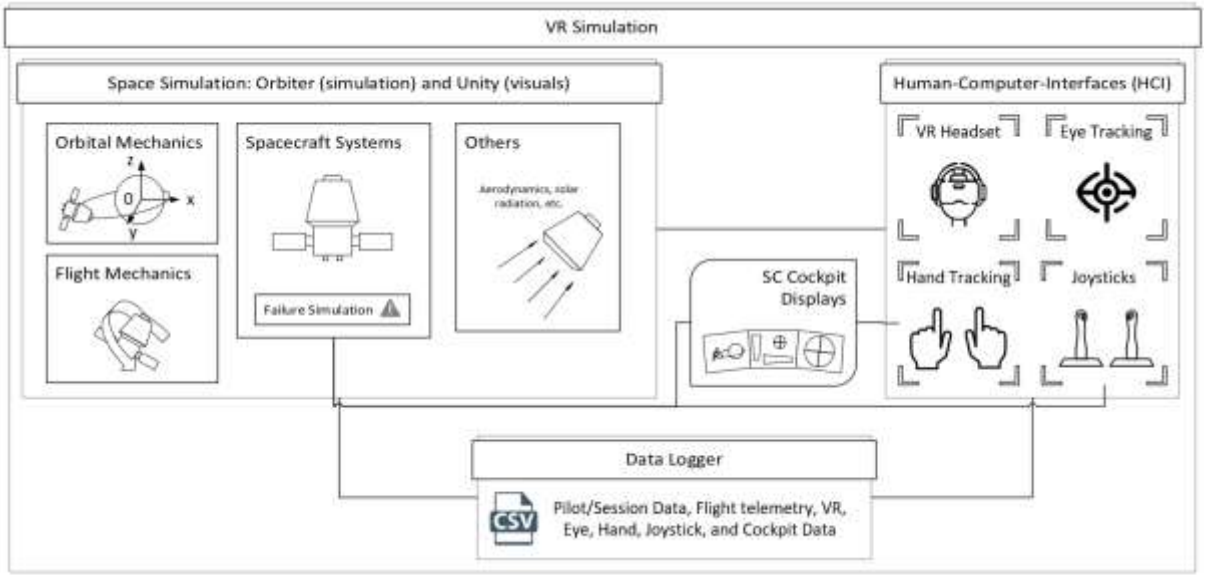

Abbildung 4: Simplified workflow of the spacecraft docking simulator developed at the IRS.

Abbildung 5: Außenansicht der Simulation mit dem PTK-Federatsiya Andocken an das LOP-G in verschiedenen Orbitalen Szenarien.

I.2.2 *Weitere Voraussetzungen*

Der Krieg zwischen Russland und der Ukraine hat die Durchführung des Projekts erheblich beeinträchtigt. Als direkte Folge wird die Teilnahme am geplanten Folgeprojekt SIRIUS-23 nicht stattfinden können. Die Daten, die für die Durchführung des Projekts benötigt werden, wurden erst im Dezember 2023 zur Verfügung gestellt, was zu Verzögerungen führte. Darüber hinaus befindet sich die benötigte Hardware immer noch in Russland, und der aktuelle Stand im Januar 2024 ist, dass sie "bald" geliefert werden soll. Diese Umstände haben dazu geführt, dass der Experimentplan nicht wie erwartet abgeschlossen werden konnte, da die Ressourcen und Bedingungen für eine erfolgreiche Durchführung des Projekts nicht rechtzeitig bereitgestellt werden konnten. Weitere Details sind im Punkt zu finden.

Eine Verletzung eines der Besatzungsmitglieder führte zu seiner Extraktion aus den Bodenanlagen und zur Reduzierung der Anzahl der Teilnehmer von 6 auf 5.

I.3 *Planung und Ablauf des Vorhabens*

Abbildung 6 zeigt den Plan des Projekts und die vorgenommenen Änderungen. Zu den wichtigsten Änderungen gehören der frühere Start von SIRIUS-21 und die Streichung von SIRIUS-23, wie bereits erwähnt, aufgrund der Kriegssituation an der Ukraine.

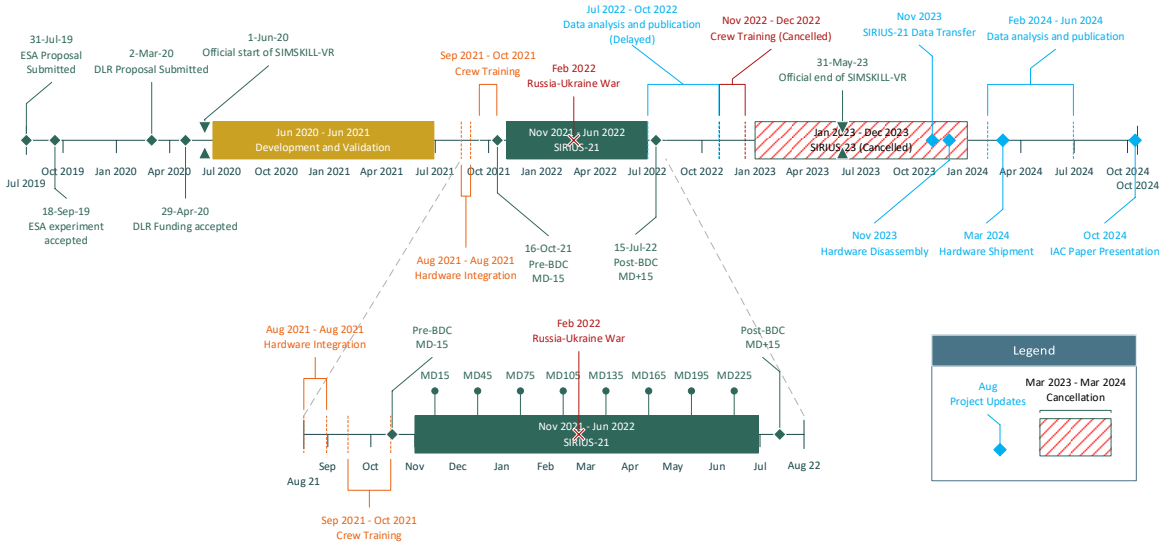

Abbildung 6: Detaillierter Verlauf des Experiments (große Ansicht in Abbildung 13)

I.3.1 *Vorarbeiten*

Die gesammelte Erfahrung, sowohl in den Vorgängerexperimenten als auch bei den Entwicklungen am IRS, ermöglichte eine präzise Definition der technischen und verfahrenstechnischen Arbeitspakete. Hinsichtlich der technischen Entwicklungen, die für die Umsetzung des neuen VR-Konzepts erforderlich waren, wurden mehrere Bachelor- und Masterarbeiten betreut, die die Entwicklung eines VR-Raumflug-Andocksimulators unterstützten (siehe Ruber [13], Töpfer [14], Ilk [15]). Zusätzlich wurden Hardware, Software und Dokumentation frühzeitig vorbereitet, um die

Implementierung des Simulators am IMBP in Moskau zu ermöglichen. Dies sollte eine benutzerfreundliche Einrichtung ermöglichen, die auch von Nicht-Experten (a priori) wie der SIRIUS-Besatzung leicht bedient werden konnte.

I.3.2 *Transport, Aufbau und Test*

Trotzdem es sich nicht um eine wissenschaftlich relevante Aktivität handelt, haben sich die notwendigen Verfahren zur erfolgreichen Überführung des Simulators nach Moskau und zur rechtzeitigen Montage vor dem Training und dem Eintritt der Besatzung in der Vergangenheit als herausfordernd erwiesen, sowohl formal als auch technisch. SIMSKILL-VR, als kompakteres Simulatorkonzept, vereinfachte den Transport der Hardware (VR-Brillen, Joysticks, mechanische Teile, Kabel usw.). Die Logistik wurde seitens der deutschen Seite vom IRS und seitens der russischen Seite sowohl von ESA Moskau als auch vom IMBP übernommen. Die aus früheren Experimenten (SIRUS-19) gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten es dem Team, die Hardware rechtzeitig an den NEK-Einrichtungen in Moskau zu erhalten.

Die Montage der Ausrüstung wurde von den Experten des SIMSKILL-VR-Teams, Santiago López Bermúdez und Miquel Bosch Bruguera, durchgeführt, die für einen ganzen Monat nach Moskau entsandt wurden, um das Experiment vorzubereiten.

Abbildung 7: Verpackung (links) und Aufbau des VR Simulators vor Ort (rechts)

Zusätzliche Software-Updates wurden vor Ort durchgeführt, da der Simulator noch einige Anpassungen hinsichtlich der Datenaufzeichnung benötigte (entscheidend für die spätere Datenanalyse).

I.3.3 *Crew Training von SIRIUS-21*

Das Besatzungstraining wurde wie geplant durchgeführt, wobei sowohl die Haupt- als auch die Ersatzbesatzungen (insgesamt 12 Teilnehmer) insgesamt 10 Stunden Training vor dem Eintritt in die Mission absolvierten, um sicherzustellen, dass alle Teilnehmer ein ähnliches Niveau an Flugleistung erreichten.

Das vor Ort durchgeführte Besatzungstraining von Santiago López und Miquel Bosch ermöglichte es, mehrere Aspekte des Simulators zu feinabstimmen und sowohl die Besatzungsmitglieder als auch die Kollegen vor Ort zu motivieren und zu unterstützen.

Abbildung 8: SIMSKILL-VR Experten am Training der SIRIUS-21 Besatzung am IMBP.

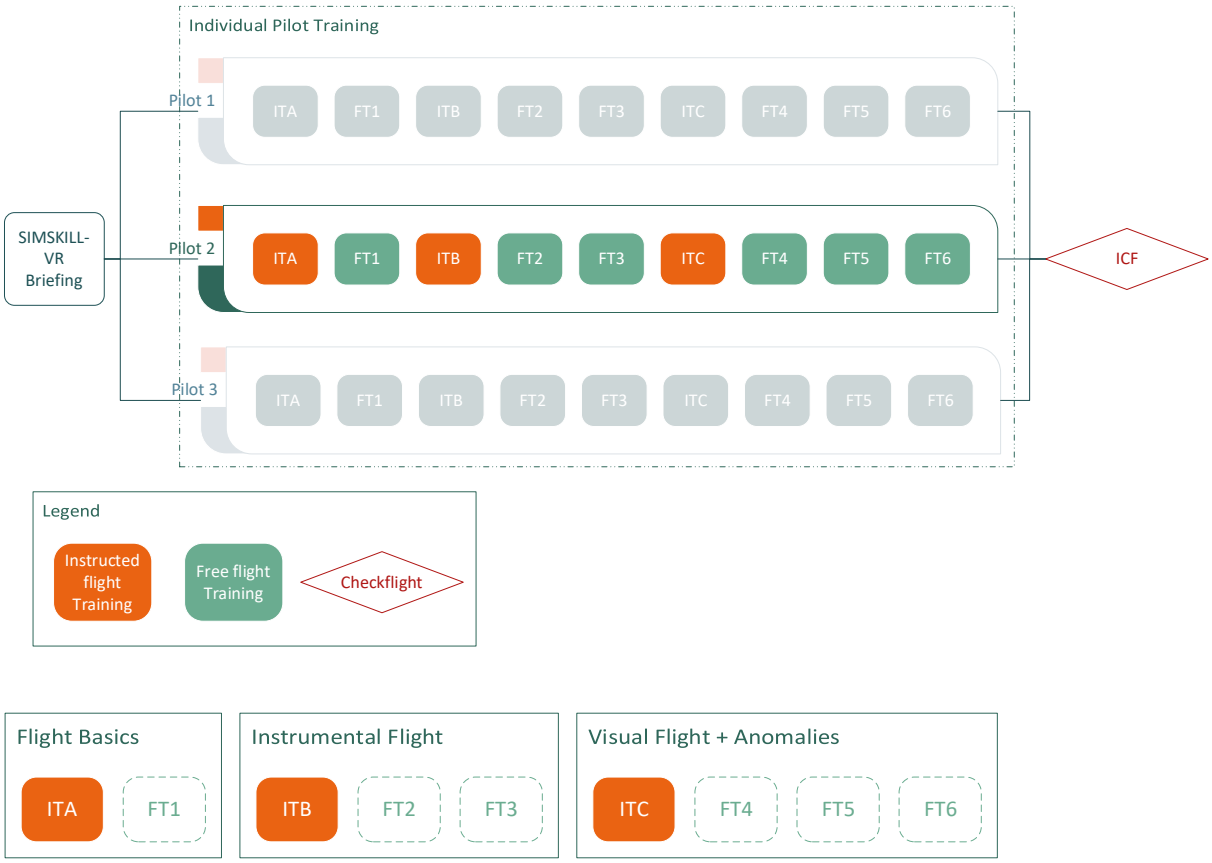

Abbildung 9: Trainingsprotokoll der SIRIUS-21 Besatzung. Jeder Teilnehmer hat 10 Trainingsstunden abgeschlossen, bevor es zum Baseline Data Collection Testflug geht (ICF).

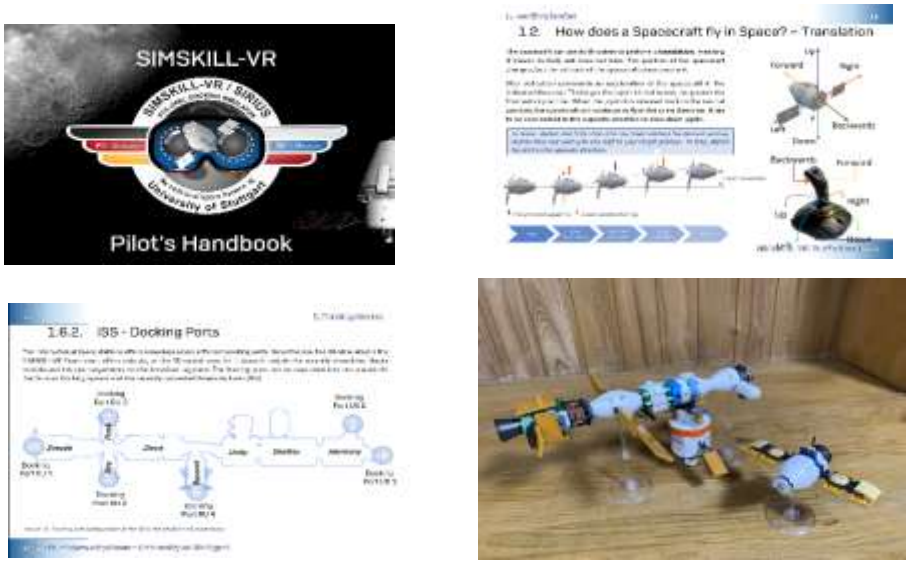

Abbildung 10: Trainingsmaterialien zur Unterstützung der Crew (Flug Logbuch sowie physisches Miniatur-modell der Raumschiffe)

I.3.4 *SIRIUS-21 Experiment*

Abbildung 11: Teilnehmer am Training (oben). SIRIUS-21 Prime Crew zusammen mit IRS Team (unten).

Das SIRIUS-21-Experiment begann etwa ein Jahr später als ursprünglich geplant aufgrund von organisatorischen Hindernissen auf russischer Seite. Dennoch ermöglichte die gründliche Vorbereitung und Planung ein vollständiges und

realistisches wissenschaftliches Protokoll, das vom IMBP, NASA und ESA kontrolliert wurde. Wie in Abbildung 9 gezeigt, führte die Besatzung während der Isolation 8 verschiedene Flugsitzungen durch, wobei auf jeder von ihnen 3 Flugszenarien durchgeführt wurden. Vor und nach der Isolation wurden die sogenannten Checkflüge als BDC (Baseline Data Collection) durchgeführt.

Eine Verletzung eines der Besatzungsmitglieder führte zu seiner Extraktion aus den Bodenanlagen und zur Reduzierung der Anzahl der Teilnehmer von 6 auf 5.

Der Beginn des Krieges auf ukrainischem Gebiet löste eine weltweite Krise mit direkten Auswirkungen auf das Projekt aus, was dazu führte, dass alle Kommunikationskanäle zwischen ESA und Russland monatelang geschlossen wurden und letztendlich die Nichtteilnahme von ESA und NASA an der später geplanten einjährigen Isolationskampagne für 2023 provozierte. Das laufende Experiment lief jedoch wie geplant weiter, und die Datensammlung verlief wie erwartet.

I.3.5 *Datenauswertung und Veröffentlichung*

Der andauernde bewaffnete Konflikt führte zu wiederholten Verzögerungen bei der Datenlieferung. Die Daten wurden Ende 2023 erstmals gesendet und werden derzeit analysiert. Sobald die Datenanalyse abgeschlossen ist, sind Veröffentlichungen geplant (zB. Bei der International Astronautical Conference und/oder Acta Astronautica)

I.3.6 *Post SIRIUS-21 Experiment und SIRIUS-23*

Wie bereits erwähnt, fand das folgende geplante Experiment bei SIRIUS-23 nicht statt. Damit ist die Rückführung der Hardware nach Stuttgart geplant. Die ESA arbeitet seit Monaten an der Rückführung dieser Hardware und informiert das Team regelmäßig über den Stand der Dinge. Derzeit finden die letzten bürokratischen Schritte statt, und die Hardware wird in den kommenden Monaten in Stuttgart erwartet.

I.4 *Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand*

Als dieses Projekt began war der Einsatz der VR-Technologien für die Forschung unter Weltraumbedingungen deutlich gestiegen. Die neudefinierte Analog-Missionen und andere Forschungsexperimente hatten von deren Aufbau-Simplizität und Realismus profitiert. Mehrere VR-Simulationen wurden bereits entwickelt, die auf einer Vielzahl an Bereichen einer Weltraummission basieren (Oberflächen-Operationen, Experimenten-Aufbau, Außeneinsatztraining, u.a.). Nichtsdestotrotz waren die bisher bekannten Forschungsprojekte noch nicht ausreichend, oder fokussieren sich nicht, ausführliche wissenschaftliche Datensätze zu Astronauten-Piloten-Performance zu liefern. Im Bereich Docking-Performance hatten Salnitski und Johannes mit Kosmonauten aus den MIR- und ISS Raumstationen Forschung durchgeführt ([16] [17]). Trotz der wertvollen Ergebnisse dieser Publikationen, war das Experimenten-

Konzept unterschiedlich und bot eine vereinfachte Version eines Raumschiff-Simulators.

Im Vergleich zu den bisherigen Arbeiten, bittet das neue Raumschiffsimulator eine realistische Simulationsumgebung, die nicht nur die Untersuchung der Piloten-Fähigkeiten der Menschen prüfen kann, sondern auch weiteren Details des menschlichen Verhaltens während einer Mission zeigt, mithilfe zusätzliche Technologien wie Eye- und Handtracking. Ähnliche Konzepte sind teilweise schon im Videogame-Markt und Sport-Industrie zu finden, aber den Zugang zu diesen Systemen ist begrenzt und für die Forschung ausgeschlossen. Die am IRS durchgeführte Forschungsprojekte (SIMSKILL und SIMKSILL-RU) haben gezeigt, dass die Pilotierungsfähigkeiten, deren Probanden unter Isolations- und Weltraumbedingungen ausgesetzt sind, eine erkennbare Abnahme zeigen [9]. Deshalb stellt das hier entwickelte System einen deutlichen technischen Sprung im Bereich Astronautentraining und Forschung unter Weltraumbedingungen und wird einen tieferen Einblick in dem Verhalten der Piloten innerhalb eines Raumschiffcockpits ermöglichen.

I.5 *Zusammenarbeit mit anderen Stellen*

Die Firma Blickshift Analytics, mit Sitz in Stuttgart, hat mittels ihre spezialisierte Eye-Tracking Auswertungssoftware das Projekt unterstützt. Ihre Expertise im Bereich Eye-Tracking hat in mehreren Stellen geholfen.

Während der Entwicklung des Projekts gab es eine enge Zusammenarbeit mit der ESA als Hauptkoordinator für das Experiment im IMBP. Es hat auch ein direkter Kontakt und eine Zusammenarbeit mit IMBP stattgefunden.

II. Durchführung des Vorhabens

II.1 *Erzielte Ergebnisse*

Notwendige Software-Arbeiten für den Einsatz des Simulators an der NEK-Anlage des IMBP in Moskau wurden durchgeführt. Das Simulator selbst wurde vervollständigt, und Eye-tracking Möglichkeiten wurden integriert. Zudem wurde ein Launcher entwickelt, um Piloten/Szenarien bei jedem Versuch festzulegen, und noch ein Data Logger, welches sich um die Erfassung aller Missionsparameter kümmert.

Die benötigte Hardware wurde erworben und nach Moskau transportiert, wo einige Wochen Flugtraining mit den SIRIUS-Kandidaten stattgefunden haben. Ein Pilot's Handbook und ein Troubleshooting Guide wurden zur Unterstützung der Kandidaten fertiggestellt.

Das Experiment selbst ist trotz durch Corona-bedingten Verzögerungen erfolgreich durchgeführt, allerdings nur mit 5 anstatt 6 Teilnehmern. Uns sind keine Probleme/Hindernisse bekannt, die während der Isolation das Experiment beeinträchtigt haben sollten. Alle wissenschaftlichen Daten sind automatisch auf dem Simulator Rechner aufgenommen und anschließend in eine externe Festplatte kopiert. Die Auswertung der Daten hat bisher leider nicht stattfinden können, da ihre Auslieferung durch den gegenwärtigen Ukraine-Konflikt verhindert worden ist.

Man hat in der Zwischenzeit weiter an dem Simulator gearbeitet, mit dem Ziel, ihn flexibler zu gestalten, unter Nutzung von neuen OpenXR Standards, und mit Multiplayer-Fähigkeiten aufzurüsten, wie im Zwischenbericht erklärt wird. Diese Arbeiten laufen noch, wobei sie noch mit einem Szenario-Editor ergänzt worden sind, bei dem verschiedenen Konfigurationen von Planeten, Monden und Raumflugkörper fertiggestellt werden können. Hierzu sind Schnittstellen zu den Ephemeriden-Datenbanken von NASA's JPL (Horizons System) eingebunden. Außerdem wurde, um den Verbindungsaufbau zwischen den in der Simulation teilnehmenden Rechner so reibungslos wie möglich zu gestalten, Network Discovery implementiert.

Derzeit wird an der Integration aller grundlegenden Systeme gearbeitet, um einen einheitlichen funktionsfähigen Prototyp zu bekommen.

II.1.1 *Eye-Tracking*

Im Bereich Eye-tracking wurden schon erste Analysen durchgeführt, in Verbindung mit den vorigen Arbeiten im Rahmen der Masterarbeit Herrn Reifs [18]. Diese ermöglichten, eine gründliche Auswertung der Eye-Tracking Messungen während den verschiedenen Flugphasen. Aktuell soll dieses Auswerteverfahren für den vollständigen Datensatz eingesetzt werden.

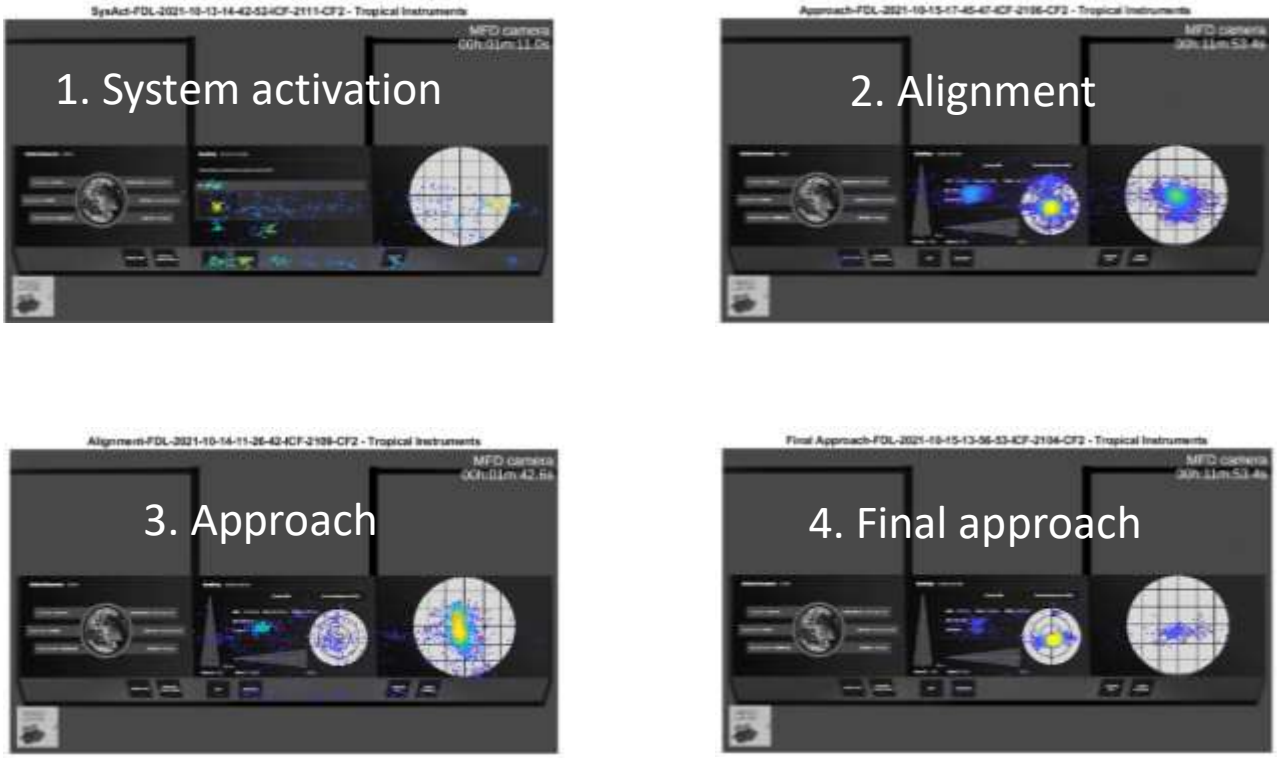

Abbildung 12: Eye-Tracking Heat Maps zur Untersuchung der Konzentration des Piloten auf die virtuelle Cockpit-Panelle während eines Fluges [21].

II.2 *Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises*

Für dieses Projekt wurde die folgende Hardware (als Investitionen) gekauft:

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Anzahl
1	VR-Computer	3
2	VR Brillen	3

Derzeit befindet sich ein Satz Computer + VR am IRS (Universität Stuttgart) und die anderen beiden Sätze, die für das SIRIUS-21-Experiment geschickt wurden, sind noch in Russland. Die ESA ist für die Rückführung der Hardware zuständig und hat diese bereits geplant und befindet sich in den letzten Schritten der Bürokratie, so dass sie bald nach Stuttgart zurückgeschickt werden sollte.

II.3 *Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit*

Nur mit Hilfe dieses Projekts konnte der VR-Simulator bei der SIRIUS-21 Mission eingesetzt werden. Wichtige benötigte Software und Hardware Komponenten und Dokumentation haben noch gefehlt, wie in Abschnitt 2.1 erwähnt. Außerdem ist der Einsatz von Eye-Tracking Technologie überhaupt erst mit diesem Projekt zu Stande gekommen. Der weitere Aufbau des Simulators wird durchgeführt, um diesen Zukunftssicherer zu gestalten. Die bisherige Infrastruktur basiert auf closed source Software, was die Flexibilität des Simulators beeinträchtigt und die Möglichkeit von Multiplayer Szenarios unterbindet. Mit dem Weiteraufbau werden diese Einschränkungen beseitigt.

II.4 *Voraussichtlicher Nutzen*

Die Arbeiten die durch dieses Projekt ermöglicht wurden haben den Simulator einsatzbereit gemacht. Er kann jetzt ohne große Schwierigkeiten bei beliebigen Experimenten eingesetzt werden. Die Portabilität von VR macht diese Einsätze besonders einfach (benötigt werden prinzipiell nur ein Rechner und eine VR-Brille). Mit dem heutigen Stand des Simulators würden sich diese Einsätze auf Single-User Docking-Simulationen beschränken; falls der Weiteraufbau fertig wird, werden verschiedene Szenarien ermöglicht. Von besonderem Interesse wäre das Training / die Analyse von Simulationen bei denen mehrere Leute zusammen arbeiten sollen (z.B. ein Dockingmanöver mit Pilot und Copilot, Simulationen von Experimenten innerhalb der ISS, usw.). Unsere Erfahrung und Ziele bisher haben sich auf dem Bereich von Performance-Analyse konzentriert, man könnte sich aber Untersuchungen im Bereich Training vorstellen.

II.5 *Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderer Stelle*

Uns sind keine Fortschritte anderer Stellen in der spezifischen Thematik dieses Projekts bekannt. Jedoch möchten wir ein paar Anmerkungen machen:

- Allgemein zum Thema VR und deren Einsatz bei der Raumfahrt sind verschiedene Projekte in den letzten Jahren durchgeführt, wie sie in [19] zusammengefasst sind.
- Besonders in der Luftfahrt sind einige Eye-Tracking Studien durchgeführt worden. Eine Metaanalyse vieler dieser Studien kann unter [20] gesehen werden.
- Schließlich, stellt [21] eine neue wissenschaftliche Software für Eye-Tracking-Analyse vor, die für dieses Projekt nützlich sein könnte.

II.6 *Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses*

Papers:

- Miquel Bosch Bruguera, Valentin Ilk, Simon Ruber, Reinhold Ewald, “Use of Virtual Reality for astronaut training in future space missions - Spacecraft piloting for the Lunar Orbital Platform -Gateway (LOP-G)”, 70th International Astronautical Congress, October 2019
- Miquel Bosch Bruguera, Juan Santiago Lopez Bermudez, “From Antarctica to Russia: Development and integration of a spaceflight simulator for the SIRIUS Analogue Mission – SIMSKILL-RU and SIMSKILL-VR”, 23rd IAA Human in Space Symposium, April 2021
- Miquel Bosch Bruguera, Juan Santiago Lopez Bermudez, Gisela Detrell, Reinhold Ewald, “Development of a Virtual Reality space docking simulator for research and training - A case application in the space analogue SIRIUS-21”, 73rd International Astronautical Congress (IAC), September 2022.
- Abstract eingereicht bei IAC 2024: “Spacecraft docking piloting performance assessment by means of virtual reality and eye-tracking a the SIRIUS-21 space analog” – M. Bosch Bruguera, S. López Bermúdez, G. Detrell, R. Ewald
- Mögliche Beiträge auf der International Astronautical Conference sowie in der Acta Astronautica werden derzeit in Betracht gezogen.

Master Thesis:

- Fabian Reif, “Development and Validation of a Piloting Performance and Behavior Analysis Mehodology for the VR Spacecraft Docking Simulator” – IRS-21-S-001. Dezember 2021
- José Espases Bennassar, “Development, implementation and validation of a flight and orbital mechanics computation module for the Virtual Reality Lunar Gateway Space Simulator”. IRS-21-S-115, September 2021
- Valentin Ilk, “Implementation of a Spacecraft Cockpit in a Virtual Reality Environment”, Masterarbeit, April 2019.

Bachelor Thesis:

- Simon Ruber, “Implementation of an Interactive Cockpit Panel for the PTK-Federatsiya Spacecraft in a Virtual Reality Environment”, Bachelorarbeit, August 2019.
- Johann Töpfer, “Implementation of spacecraft systems in the Federatsiya Cockpit for a Virtual Reality Simulation”, Bachelorarbeit, März 2020.

III. Referenzen

[1] J. M. M. Barata und F. M. S. P. Neves, „The History of Aviation Education and Training," *Open Journal of Applied Sciences,* Bd. 07, pp. 196-205, 2017.

[2] R. B. Voas, *PROJECT MERCURY ASTRONAUT TRAINING PROGRAM,* 1960.

[3] S. D. Beard, „Space Shuttle Landing and Rollout Training at the Vertical Motion Simulator," 2001.

[4] R. Hall und D. Shayler, Soyuz: a universal spacecraft, Springer Science & Business Media, 2003.

[5] J. Chardonnet, C. D. Loreto, J. Ryard und A. Housseau, „A Virtual Reality Simulator to Detect Acrophobia in Work-at-Height Situations," in *Proc. IEEE Conf. Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2018.

[6] E. Dayan, Sonarion-Hadassah, A. Virtual und R. Center., „ARGAMAN: Rapid Deployment Virtual Reality System for PTSD Rehabilitation," IEEE, 2006.

[7] R. E. M. Oliveira und J. C. Oliveira, „Virtual Reality System for the Treatment of Acrophobia," in *Proc. 19th Symp. Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 2017.

[8] C. R. Jetly, L. C. Meakin, E. H. Sinitski, L. Blackburn, J. Menard, M. Vincent und M. Antwi, „Multi-Modal virtual-reality based treatment for members with combat related posttraumatic stress disorder: Canadian Armed Forces pilot study," in *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, 2017.

[9] M. B. Bruguera, A. Fink, V. Schröder, E. Dessy, F. Berg, G. Lawson, C. Dangoisse, C. Possnig, N. Albertsen, N. Pattyn und R. Ewald, „Assessment of the effects of isolation, confinement and hypoxia on space-flight performance for future space missions - The SIMSKILL experiment in Antarctica," in *70th International Astronautics Congress*, 2019.

[10] M. B. Bruguera, A. Fink, V. Schröder, S. L. Bermúdez, E. Dessy, F. P. van den Berg, G. Lawson, C. Dangoisse, C. Possnig, N. Albertsen, N. Pattyn und R. Ewald, „Assessment of the effects of isolation, confinement and hypoxia on spaceflight piloting performance for future space missions - The SIMSKILL experiment in Antarctica," *Acta Astronautica,* Bd. 179, pp. 471-483, 2021.

[11] M. B. Bruguera, V. Schöneich, A. Fink, V. Schröder, E. Dessy, N. Pattyn und R. Ewald, „Spacecraft piloting performance assessment - A computational evaluation methodology for the SIMSKILL experiment," in *Proceedings of the 68th International Astronautical Congress, Adelaide, AUS*, 2017.

[12] M. B. Bruguera und R. Ewald, „Untersuchung der Degradation von Pilotenfähigkeiten in Isolation unter Verwendung eines Raumfahrzeugsimulators (SIMSKILL),“ 2021.

[13] S. Ruber, *Implementation of an Interactive Cockpit Panel for the PTK-Federatsiya Spacecraft in a Virtual Reality Environment,* 2019.

[14] J. Töpfer, *Implementation of Spacecraft Systems in the Federatsiya Cockpit for a Virtual Reality Simulator,* 2020.

[15] V. Ilk, *Implementation of a spacecraft cockpit in a Virtual Reality environment,* 2019.

[16] B. Johannes, V. Salnitski, H. Soll, M. Rauch, K.-M. Goeters, P. Maschke, D. Stelling und H. Eißfeldt, „Performance assessment in a flight simulator test—Validation of a space psychology methodology,“ *Acta Astronautica,* Bd. 60, pp. 379-382, 2007.

[17] B. Johannes, V. Salnitski, H. Soll, M. Rauch und H.-J. Hoermann, „De-individualized psychophysiological strain assessment during a flight simulation test—Validation of a space methodology,“ *Acta Astronautica,* Bd. 63, pp. 791-799, 2008.

[18] F. Reif, *Development and Validation of a Piloting Performance and Behavior Analysis Methodology fot the VR Spacecraft Docking Simulator,* 2021.

[19] M. B. Woodland, J. Ong, N. Zaman, M. Hirzallah, E. Waisberg, M. Masalkhi, S. A. Kamran und A. G. Lee, „Applications of extended reality in spaceflight for human health and performance,“ *Acta Astronautica,* pp. 748-756, 2024.

[20] L. Mengtao, L. Fan, X. Gangyan und H. Su, „Leveraging eye-tracking technologies to promote aviation safety- A review of key aspects, challenges, and future perspectives,“ *Safety Science,* Nr. 168, p. 106295, 2023.

[21] S. Goodwin, A. Prouzeau, R. Whitelock-Jones, C. Hurter, L. Lawrence, U. Afzal und T. Dwyer, „VETA: Visual eye-tracking analytics for the exploration of gaze patterns and behaviours,“ *Visual Informatics,* Nr. 6, pp. 1-13, 2022.

IV. Anlagen

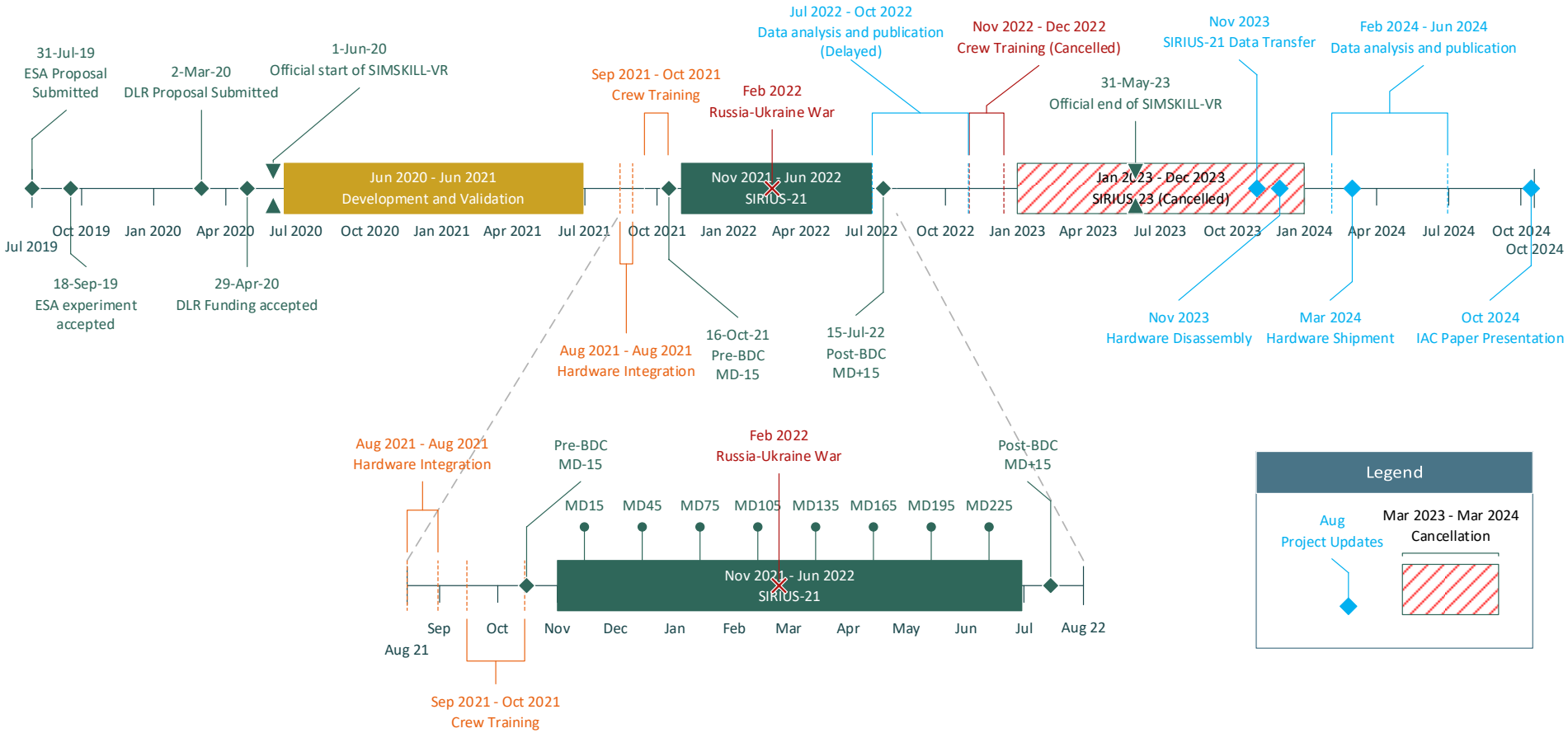

Abbildung 13: Detaillierter Projektverlauf des SIMSKILL-VR Experiments